



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**PROPIEDADES FRICCIONALES DEL COMPLEJO MÁFICO EL TENIENTE  
Y DE LOS SISTEMAS DE FALLAS ASOCIADOS AL YACIMIENTO**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA**

**JAVIERA ALEJANDRA FIELDHOUSE GARCÍA**

**PROFESOR GUÍA:**

LUIS ORELLANA ESPINOZA

**PROFESORA CO-GUÍA:**

SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

JAVIER VALLEJOS MASSA

MARISOL LARA CASTILLO

Este trabajo ha sido financiado por:  
Advanced Mining Technology Center (AMTC)

SANTIAGO DE CHILE

2024

# PROPIEDADES FRICCIONALES DEL COMPLEJO MÁFICO EL TENIENTE Y DE LOS SISTEMAS DE FALLAS ASOCIADOS AL YACIMIENTO

El yacimiento el Teniente es considerado el yacimiento subterráneo de cobre-molibdeno más grande del mundo [Skewes et al., 2002], el cual consta de un pórfido diorítico en el centro que se introduce en la roca principal que es el Complejo Máfico El Teniente (CMET). En cuanto a la geología estructural, el yacimiento está dominado por una familia de fallas mayores, las cuales tienen el potencial de generar un impacto sobre la estabilidad de la mina.

Para estudiar las propiedades mecánicas de la roca CMET (Complejo Máfico El Teniente) la cual es la unidad principal del yacimiento, se extrajeron rocas de El Teniente, se pulverizaron muestras y se llevaron a cabo experimentos de laboratorio, donde las muestras se sometieron a diferentes tasas de deformación y carga, bajo estrés biaxial utilizando el equipo HighSTEPS (A High Strain Temperature Pressure and Speed Apparatus to Study Earthquake Mechanics). Además, se realizaron ensayos en muestras de fallas en testigos para determinar la relación que existe entre la mineralogía de relleno de las fallas y las propiedades friccionales de estas. Estos últimos ensayos se realizaron el equipo de cizalle DTS 30/30 kN.

Los resultados para las rocas pulverizadas del CMET muestran que la fricción máxima ( $\mu_{peak}$ ) y la fricción en estado estacionario ( $\mu_{ss}$ ) varían de 0,38 a 0,63 y de 0,40 a 0,68, respectivamente. Además, la dependencia de la fricción según la velocidad de deslizamiento indica un régimen de fortalecimiento de la velocidad, con el parámetro de la tasa de fricción (a-b) que aumenta a medida que se ejerce mayor presión normal. Estos resultados de (a-b) indican que si la falla se reactiva, se favorece un comportamiento de deslizamiento sísmico, lo que dificulta la nucleación de los terremotos y la debilidad a largo plazo, resultando en una falla estable.

En cuanto a los resultados en las muestras de falla en testigos se muestran valores de fricción entre 0.3 y 0.6, y sugieren que existe un control mineralógico significativo en las propiedades friccionales de las fallas presentes en el yacimiento, donde específicamente la Molibdenita juega un rol esencial en la estabilidad de las fallas.



*A mi madre, Michelle. A mi padre, Ronald.  
A mi hermano, Santiago.  
A mis abuelos Maryse, Peter y Sylvia.  
A mis ángeles Miguel e Irma.*

# Agradecimientos

Todo el camino que he vivido hasta este momento sin duda no ha sido fácil, lleno de altos y bajos. Y es por eso que quiero partir agradeciéndome a mí, a mi constancia y compromiso por superar cada etapa y reto que me fue poniendo la vida, de la mejor manera que pude.

Sin embargo, no puedo dejar de agradecer a mi familia, las personas que siempre me han entregado su apoyo y confianza, mis padres (Michelle y Ronald), mi hermanito Santiago, al que amo profundamente y me ha dado la fortaleza para seguir siempre adelante, a mi abuela Maryse por siempre estar rezando y pidiendo para que todo se me cumpla, a mis abuelos Peter y Sylvia que siempre han estado para mí, a mis padrinos Maryse y Felipe que desde que nací han sido mis segundos padres.

La etapa universitaria no fue fácil, sobre todo los primeros años de plan común, por eso quiero partir agradeciendo a Bunster, Nacho, Jose, Franco y Javier por la compañía esos primeros años. Quiero agradecer a mis amigos que formé en la carrera de geología, los cuales son un grupo bastante amplio, pero no puedo dejar de nombrar a mis niñas Camila y Karin, a mi partner Joaquín y a mis amigos Camilo, Alexis, Curi y Guille, los que siempre estuvieron dispuestos a escucharme, hacerme reír y retarme cuando era necesario.

Agradezco a Juanca, a quién conocí en mi último año de universidad, pero se ha convertido en un pilar fundamental para superar esta etapa, ya que si bien yo sabía que quedaba poco, necesitaba que alguien me recordara que se lograría, que no podía tirar la toalla y siempre estarían allí conmigo.

Por último, quiero dar las gracias a mi profesor guía Luis Felipe, quien me entregó las herramientas, confianza y aprendizajes necesarios para culminar esta etapa universitaria.

A todos los quiero mucho y espero que estén tan orgullosos de mí como yo lo estoy.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. División El Teniente . . . . .	2
1.1.1. Complejo Máfico El Teniente . . . . .	3
1.1.2. Fallas . . . . .	3
1.2. Objetivos de la investigación . . . . .	3
1.2.1. Objetivo general . . . . .	3
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	3
1.3. Alcances de la investigación . . . . .	4
1.4. Hipótesis de la investigación . . . . .	4
1.5. Estructura de la Tesis . . . . .	4
<b>2. Marco geológico</b>	<b>5</b>
2.1. Geología Regional . . . . .	6
2.1.1. Rocas estratificadas . . . . .	9
2.1.2. Rocas intrusivas . . . . .	11
2.1.3. Estructuras . . . . .	12
2.2. Geología del yacimiento . . . . .	13
2.2.1. Unidades litológicas . . . . .	14
2.2.2. Estructuras del yacimiento . . . . .	17
<b>3. Marco teórico</b>	<b>19</b>
3.1. Propiedades friccionales . . . . .	19
3.1.1. Velocity Step o prueba de paso de velocidad . . . . .	22
3.1.2. Slide-hold-slide o deslizamiento-mantenimiento-deslizamiento . . . . .	23
3.2. Propiedades friccionales en roca . . . . .	24
<b>4. Metodología</b>	<b>27</b>
4.1. Salbanda ( <i>fault gouge</i> ) simulada . . . . .	27
4.1.1. Estructuras . . . . .	28
4.1.2. Equipo HighSTEPS . . . . .	29
4.1.3. Procedimiento . . . . .	30
4.2. Muestras de falla . . . . .	32
4.2.1. Muestras . . . . .	32

4.2.2.	Equipo DST 30/30 kN . . . . .	37
4.2.3.	Procedimiento . . . . .	38
<b>5.</b>	<b>Resultados</b>	<b>42</b>
5.1.	Muestras gubia simulada . . . . .	42
5.1.1.	Fricción . . . . .	42
5.1.2.	Parámetro a-b . . . . .	44
5.1.3.	Healing . . . . .	45
5.2.	Muestras fallas . . . . .	45
5.2.1.	Fricción . . . . .	46
5.2.2.	Prámetro a-b . . . . .	55
5.2.3.	Rugosidad . . . . .	56
<b>6.</b>	<b>Discusiones</b>	<b>58</b>
6.1.	Gubia simulada . . . . .	58
6.1.1.	Mineralogía . . . . .	58
6.1.2.	Microestructuras . . . . .	58
6.1.3.	Esfuerzo y fricción . . . . .	58
6.1.4.	Parámetro a-b . . . . .	59
6.1.5.	Healing . . . . .	59
6.2.	Fallas . . . . .	59
6.2.1.	Esfuerzo y Fricción . . . . .	59
6.2.2.	Parámetro a-b . . . . .	62
6.2.3.	Rugosidad . . . . .	62
6.3.	Implicancias . . . . .	62
<b>7.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>63</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>66</b>
0.1.	Anexo A: Base de datos salbanda simulada . . . . .	70
0.2.	Anexo B: Base de datos muestras de falla . . . . .	72

# Índice de Tablas

2.1.	Clasificación sistemas de Falla de acuerdo a División El Teniente [GRMD, 2014].	17
4.1.	Muestras CMET . . . . .	28
4.2.	Mineralogía CMET . . . . .	28
4.3.	Descripción muestras . . . . .	34
4.4.	Sistemas de fallas asociados a las muestras estudiadas. . . . .	35
4.5.	Descripción muestras ensayadas . . . . .	36
5.1.	Valores de fricción y resistencia de corte inherente ( $\tau_o$ ) obtenidos por falla. . .	54
7.1.	Valores de fricción promedio por falla . . . . .	64
0.1.	Base de datos friccionales para gubia simulada en condición seca. . . . .	70
0.2.	Base de datos friccionales para gubia simulada en condición húmeda. . . . .	71
0.3.	Base de datos friccionales para muestras de fallas. . . . .	72
0.4.	Base de datos friccionales para muestras de fallas (continuación). . . . .	73

# Índice de Ilustraciones

2.1.	Ubicación . . . . .	5
2.2.	Mapa con las unidades morfológicas principales de la VI Región (Atlas de la República de Chile, IGM 1982). . . . .	6
2.3.	Mapa de geología regional. Extraído de Faúndez, 2001. . . . .	8
2.4.	Mapa geológico del nivel 1983 del yacimiento. Facilitado por CODELCO, El Teniente. Con nombres de fallas principales en recuadros celestes. . . . .	16
2.5.	Características de Fallas Principales de la mina El Teniente. Referencias: (1) Seguel, 2013 (GRMD-SGL-I-070-2013), (2) Seguel et al., 2015 y (3) Estándares y Metodologías de trabajo para Geología de Minas. *El material de relleno se estima en base a descripción de mano realizada por la división El Teniente. . . . .	18
3.1.	Diagrama esquemático de un experimento típico de fricción. Imagen extraída de Byerlee (1978). . . . .	19
3.2.	Diagrama esquemático de la fuerza de fricción representada en función del desplazamiento del objeto. Imagen extraída de Byerlee (1978). . . . .	20
3.3.	Criterio de Mohr Coulomb. Extraído de Scholz [2019]. . . . .	21
3.4.	Experimentos de fricción realizados a diferentes tensiones normales (de 4 MPa a 30 MPa) en una configuración de doble corte. Orellana et. al. 2018 . . . . .	22
3.5.	Dependencia de respuesta friccional frente a cambios de velocidad de deslizamiento. Imagen extraída de Marone [1998]. . . . .	22
3.6.	Parámetros a y b de la dependencia de la respuesta de fricción de los cambios en la velocidad de deslizamiento. Elaboración propia. . . . .	23
3.7.	Prueba de slide-hold-slide. Imagen extraída de Marone [1998]. . . . .	24
3.8.	Parámetros friccionales en calcita. [Carpenter et al., 2016] . . . . .	25
3.9.	Parámetros friccionales en mezcla talco-calcita. [Giorgetti et al., 2015] . . . . .	26
4.1.	Muestras vistas en microscopio. . . . .	29
4.2.	Esquema de equipo HighSTEPS. Violay (2021). . . . .	30
4.3.	Muestra pre ensayos en equipo HighSTEPS. Foto editada de Orellana et al. [2018]. . . . .	30
4.4.	Configuración de doble corte directo utilizada en estos experimentos. . . . .	31
4.5.	Coefficiente de fricción versus desplazamiento durante la secuencia de pasos de velocidad. Ejemplo de ensayo en muestra h298. Elaboración propia. . . . .	32

4.6.	Coeficiente de fricción versus desplazamiento o tiempo durante la secuencia de deslizamiento-mantenimiento-deslizamiento. Ejemplo de ensayo en muestra h298. Elaboración propia. . . . .	32
4.7.	Planta geológica del nivel Mina 1983. Ubicación muestras de sondajes en puntos rojo y fallas asociadas en recuadros celestes. . . . .	33
4.8.	Esquemas de equipo DTS 30/30 kN. Walter + Bai AG (2022) . . . . .	38
4.9.	Muestra pre ensayos en equipo DTS 30/30 kN. . . . .	38
4.10.	Muestra montada en portamuestras para experimento en equipo de cizalle . .	39
4.11.	Perfilómetro óptico. . . . .	39
4.12.	Gráfico esperado para un cambio de esfuerzos normales (2, 4 y 6 MPa). . . . .	40
4.13.	Ejemplo de ensayos de corte de múltiples etapas bajo diferentes cargas normales (a) sin reposicionamiento y (b) con reposicionamiento. ISRM, Muralha et al. [2014] . . . . .	40
4.14.	Gráfico esperado para un cambio de velocidades (3, 10, 30, 100 y 300 $\mu\text{m/s}$ ). Velocity step. . . . .	41
5.1.	Experimentos de fricción realizados en las 10 muestras de gubia simulada de CMET a diferentes tensiones normales (de 10 MPa a 60 MPa), 5 en condición seca y 5 en condición húmeda. Muestras especificadas en tabla 4.1 . . . . .	42
5.2.	Coeficiente de fricción de Amonton $\mu$ (ecuación 2.1) en función del esfuerzo normal. . . . .	43
5.3.	Esfuerzo cortante versus esfuerzo normal en muestras de gubia simulada de CMET, en condición seca y húmeda. . . . .	43
5.4.	Parámetro de fricción de estabilidad (a-b) frente al estrés normal en muestras de gubia simulada de roca CMET. . . . .	44
5.5.	Distancia crítica de deslizamiento frente al estrés normal. . . . .	45
5.6.	Parámetro de curación por fricción $\Delta\mu$ versus el tiempo de espera. . . . .	45
5.7.	Gráfico de esfuerzo de corte para Falla NW (2, 4 y 6 MPa). . . . .	46
5.8.	Gráfico de esfuerzo de corte para Falla L (2 y 4 MPa). . . . .	47
5.9.	Gráfico de esfuerzo de corte para Falla P (2, 4 y 6 MPa). . . . .	47
5.10.	Gráfico de esfuerzo de corte para Falla S (2, 4 y 6 MPa). . . . .	48
5.11.	Gráfico de esfuerzo de corte para Falla N1 (2, 4 y 6 MPa). . . . .	48
5.12.	Gráfico de esfuerzo de corte para Falla N2 (2, 3, 4, 5 y 6 MPa). . . . .	49
5.13.	Gráfico de esfuerzo de corte para Falla N3 (2, 3, 4, 5 y 6 MPa). . . . .	49
5.14.	Gráficos de cambios de velocidad de desplazamiento para Fallas (a) NW, (b) L, (c) P y (d) S . . . . .	50
5.15.	Gráficos de cambios de velocidad de desplazamiento para Fallas (a) N1, (b) N2 y (c) N3. . . . .	51
5.16.	Gráficos esfuerzo normal vs esfuerzo de corte con línea de tendencia para obtener coeficiente de fricción de sistema de Falla (a) NW, (b) L, (c) P y (d) S . . . . .	52
5.17.	Gráficos esfuerzo normal vs esfuerzo de corte con línea de tendencia para obtener coeficiente de fricción de sistema de Falla (a) N1, (b) N2 y (c) N3. . . . .	53

5.18.	Gráfico de parámetro (a-b). (a) Para las 7 fallas estudiadas y (b) según contenido de Molibdenita. . . . .	56
5.19.	Ejemplo de perfil topográfico obtenido del software Vision64 . . . . .	57
5.20.	Gráfico de parámetro Sa de rugosidad pre y post ensayos. . . . .	57
6.1.	Gráfico Desplazamiento horizontal vs Esfuerzo de corte para las 7 fallas (NW, L, P, S, N1, N2 y N3) . . . . .	60
6.2.	Gráfico con los valores de fricción y resistencia al corte inherente para los distintos tipos de fallas. Esfuerzo normal vs Esfuerzo de corte. . . . .	61
6.3.	Gráfico con los valores de fricción dinámica con respecto al contenido de Molibdenita en cada muestra. . . . .	61
7.1.	Gráfico con los valores de fricción dinámica con respecto al contenido de Molibdenita en cada muestra sumado al caso de las rocas pulverizadas de CMET. . . . .	64
7.2.	Gráfico con los valores de a-b con respecto al contenido de Molibdenita en cada muestra sumado al caso de las rocas pulverizadas de CMET. . . . .	65



# Capítulo 1

## Introducción

A lo largo de los años, considerando que Chile es un país altamente sísmico, la presencia de fallas geológicas en la zona del yacimiento El Teniente ha generado una incertidumbre en la seguridad de la mina, debido a la posibilidad de terremotos provocados por la inestabilidad de la falla, teniendo en cuenta que los terremotos en la corteza terrestre son causados por movimientos a lo largo de fallas geológicas. Por esta razón, el estudio del deslizamiento por fricción entre las rocas es un requisito previo importante para la comprensión de los mecanismos sísmicos [Byerlee, 1978].

En esta investigación, se buscan establecer propiedades friccionales críticas de las rocas del yacimiento El Teniente, las cuales son claves en la iniciación, propagación, y detención de los movimientos de una falla geológica y la ocurrencia de eventos sísmicos asociados [Byerlee, 1978] [Shimamoto y Logan, 1981], específicamente en 7 fallas del yacimiento. Estos eventos sísmicos pueden ser de gran magnitud como los terremotos de subducción, o de menor escala usualmente atribuidos a la gestión antropogénica.

De esta forma, valores de fricción iguales a 0.6 por si solos, si bien referenciales [Byerlee, 1967], pueden implicar sobre o subestimaciones de la respuesta real de los sistemas de fallas sometidas a cambios de esfuerzos, los cuales son más evidentes ante cambios y magnitudes de esfuerzos mayores.

Varias líneas de evidencia sugieren que la mayoría de las fallas sísmicamente activas son estructuras estáticamente fuertes con fricción,  $\mu$ , en el rango de 0,60 a 0,85 [Byerlee, 1978];[Scholz, 2019].

Sin embargo, la resistencia friccional tiende a cambiar con la cantidad de desplazamiento, presumiblemente debido a procesos de desgaste [Paterson y Wong, 2005], por lo que un coeficiente de fricción específico puede tomarse como referencia a un estado estable alcanzado después de una cierta cantidad de deslizamiento o a un estado transitorio en una etapa dada en la historia del deslizamiento.

Por otro lado, los minerales cumplen un rol muy importante en cuanto a la resistencia del material. Por ejemplo, estudios anteriores muestran que el coeficiente de fricción disminuye con el contenido de arcillas [Paterson y Wong, 2005] y es mayor con minerales como la anhidrita, pirita y turmalina [CODELCO, 2023]. Es por esto, que durante este estudio se intenta asociar la mineralogía de las muestras estudiadas de El Teniente con sus propiedades friccionales.

Otra propiedad a estudiar es el parámetro de tasa de fricción (a-b), en el contexto de las reglas friccionales constitutivas de “rate-and-state” [Dieterich, 1979][Marone, 1998][Ruina, 1983][Scholz, 2019], ya que se ha demostrado que ciertos materiales, y a distintas tasas de deslizamiento, muestran un comportamiento tipo “velocity-strengthening” o “velocity-weakening”, condicionando la respuesta sísmica o asísmica del material, las cuales se pueden interpretar con dicho parámetro a-b.

Por último, se mide el valor del healing, que es la recuperación de la fricción, es decir, la variación de la fricción al realizar pausas en el deslizamiento y luego retomar el experimento.

Finalmente, como consecuencia del deslizamiento, hay varios efectos en la superficie, dentro de los cuales destaca el desarrollo de ranuras, hendiduras u otras irregularidades, además de la generación de gubia de falla o salbanda, la cual es el producto del desgaste y rellena las fallas geológicas [Hoskins et al., 1968]. Estas consecuencias tendrán efecto en la rugosidad de la superficie, como lo señala Power et al. [1987], existe una limitación significativa en el estudio de dichos perfiles de rugosidad, tanto debido a la heterogeneidad intrínseca de las superficies de la falla que pueden haber existido en el momento de la falla, como porque la degradación posterior de la superficie por la meteorización puede introducir variabilidad y errores en la determinación de la pendiente del espectro.

Dicho todo lo anterior, estudiando roca pulverizada del Complejo Máfico El Teniente (simulación de gubia/salbanda) y muestras de testigos de 7 fallas que están dentro del yacimiento, se pretende realizar un análisis de las propiedades friccionales obtenidas y determinar si es que hay alguna relación con la mineralogía de relleno que poseen las fallas, con el fin de tener mayor antecedentes de estabilidad antes de tomar futuras decisiones sobre la aplicación de esfuerzos en minería, y prevenir lo que puede ser una condición de riesgo de la infraestructura subterránea y la operación minera.

## 1.1. División El Teniente

El Teniente es el yacimiento de cobre subterráneo más grande del planeta. Está ubicado en la comuna de Machalí, Región del Libertador Bernardo O´Higgins, a 50 kilómetros de la ciudad de Rancagua. Comenzó a ser explotado en 1905 y ya cuenta con más de 4500 kilóme-

tros de galerías subterráneas.

Su explotación está a cargo de La División El Teniente, un complejo minero-metalúrgico perteneciente a la Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO). Hoy en día, la División El Teniente lleva a cabo un procesamiento de aproximadamente 140 mil toneladas por día (ktpd), que se utiliza para refinar alrededor de 450,000 toneladas de cobre fino anualmente. Este proceso convierte a la división en un elemento clave para el crecimiento económico del país, siendo fundamental en dicho aspecto [CODELCO, 2023].

### **1.1.1. Complejo Máfico El Teniente**

El Complejo Máfico El Teniente o CMET es la unidad principal del yacimiento, constituida por un conjunto de rocas subvolcánicas con composición básica y afinidad toleítica [Skewes et al., 2002], con tres unidades litológicas principales (gabro, diabasa y pórfido basáltico). Posee una alteración generalizada de biotita potásica portada por vetas de cuarzo-sericita o cuarzo-calcopirita, junto a discontinuidades reconocidas que son principalmente fallas muy espaciadas y un stockwork formado por una red de alta frecuencia de pequeñas vetas.

### **1.1.2. Fallas**

El yacimiento consta de 14 fallas principales, las cuales se caracterizan por tener una persistencia mayor a 100 metros [GRMD, 2014]. La dirección predominante es NE-SW, con geometrías del tipo dúplex. Cabe destacar que las fallas poseen una orientación subcircular que se superpone a la orientación principal NE-SW, la cual rodea al pórfido que se encuentra al centro del yacimiento [GRMD, 2018].

## **1.2. Objetivos de la investigación**

### **1.2.1. Objetivo general**

El objetivo principal es determinar el comportamiento friccional de 7 de los sistemas estructurales de la División El Teniente.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Obtener parámetros friccionales en gubia de falla simulada de CMET.
- Estudiar mecanismos de deformación a escala laboratorio.
- Analizar la mineralogía y sus efectos en el comportamiento friccional.
- Asociar comportamiento friccional a sistemas de fallas principales de la División El Teniente.

### **1.3. Alcances de la investigación**

Dentro de las restricciones y consideraciones iniciales del trabajo y dado lo extenso del análisis a realizar se consideró lo siguiente:

- La disponibilidad de muestras para ensayar se ajusta a las disponibilidades establecidas por la división El Teniente.
- Las muestras de gubia simulada de falla no constan con una ubicación determinada, por lo que no se asocian a un sistema de falla específico.
- No se cuenta con la orientación de los sondajes ensayados.
- El tiempo para estar en laboratorio es acotado.

### **1.4. Hipótesis de la investigación**

La hipótesis planteada es que existe un control mineralógico en las propiedades friccionales de las fallas, tanto como en los parámetros friccionales como en la estabilidad de estas.

### **1.5. Estructura de la Tesis**

Este artículo presenta en primer lugar la introducción al tema de investigación presentando los objetivos, alcances y antecedentes. Luego, una breve contextualización geológica del caso de estudio, para posteriormente pasar a la metodología utilizada para la descripción de las muestras y en los experimentos de laboratorio. Además, se mostrarán los resultados de las descripciones de las muestras ensayadas, su localización en el yacimiento y la asociación estructural a distintos sistemas de falla, para después presentar los resultados de los ensayos de laboratorio y las conclusiones de estos.

# Capítulo 2

## Marco geológico

El área de estudio denominada Distrito el Teniente, se ubica en las coordenadas  $34^{\circ}05'39''\text{S}$  y  $70^{\circ}21'03''\text{O}$  en la comuna de Machalí, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, en el flanco occidental de la Cordillera de los Andes. La mina está situada a unas 2 horas al sur de Santiago, la capital de Chile. La ciudad más cercana es Rancagua, que se encuentra a 67 km al oeste de la mina, y está comunicada por la Carretera del Cobre (Figura 2.1).



Figura 2.1: Ubicación

Dentro de los recursos de esta división se incluyen tanto la mina subterránea como la mina a cielo abierto, además de las instalaciones necesarias para llevar a cabo el proceso de concentración y refinamiento de los minerales de cobre y molibdeno. La mineralización de cobre y molibdeno se hospeda mayoritariamente en minerales sulfurados hipógenos (calcopirita, bornita y molibdenita), y ocurre principalmente como relleno de vetillas ( $\sim 90\%$ ) y como cemento en brechas ( $10\%$ ) magmático-hidrotermales de biotita, anhidrita, cuarzo y turmalina, además, y en menor proporción, diseminada en la matriz de cuerpos intrusivos félsicos [Cárdenas, 1986].

## 2.1. Geología Regional

La morfología de la región, se compone de cuatro unidades mayores que han sido definidas en Chile Central por Charrier [1981]: La Cordillera de los Andes, el Valle Central, la Cordillera de la Costa y las Planicies Costeras (Figura 2.2).

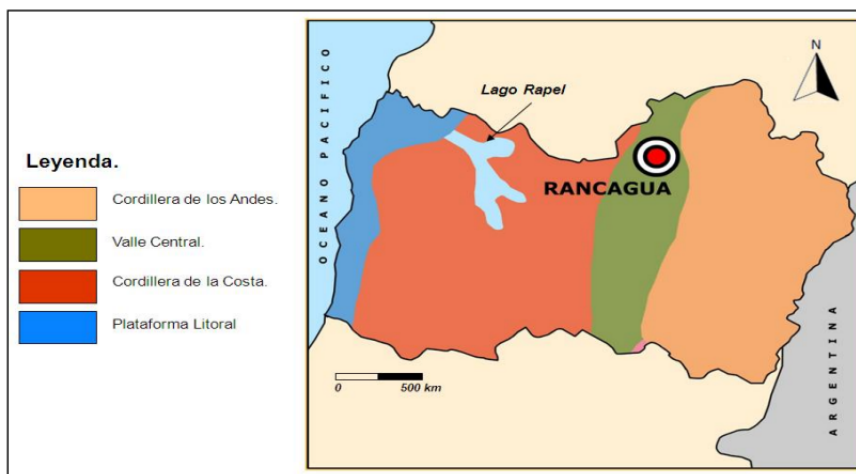


Figura 2.2: Mapa con las unidades morfológicas principales de la VI Región (Atlas de la República de Chile, IGM 1982).

La Cordillera Principal, también conocida como la Cordillera de los Andes, es el sector próximo a Rancagua, que presenta cimas con altitudes cercanas a los 5000 m.s.n.m. El Teniente se emplaza en el faldeo occidental de la Cordillera de los Andes. Esta unidad morfológica está formada por rocas estratificadas que datan desde el Mesozoico hasta el Terciario. Estas rocas estratificadas han sido afectadas por la intrusión de rocas plutónicas e hipabisales del Terciario [Fuenzalida, 1967]. A lo largo del tiempo, han experimentado un considerable acortamiento en la corteza en la dirección este-oeste, así como un aumento en su grosor. Estos cambios han sido resultado de fases compresivas que han generado empujes y plegamientos significativos.

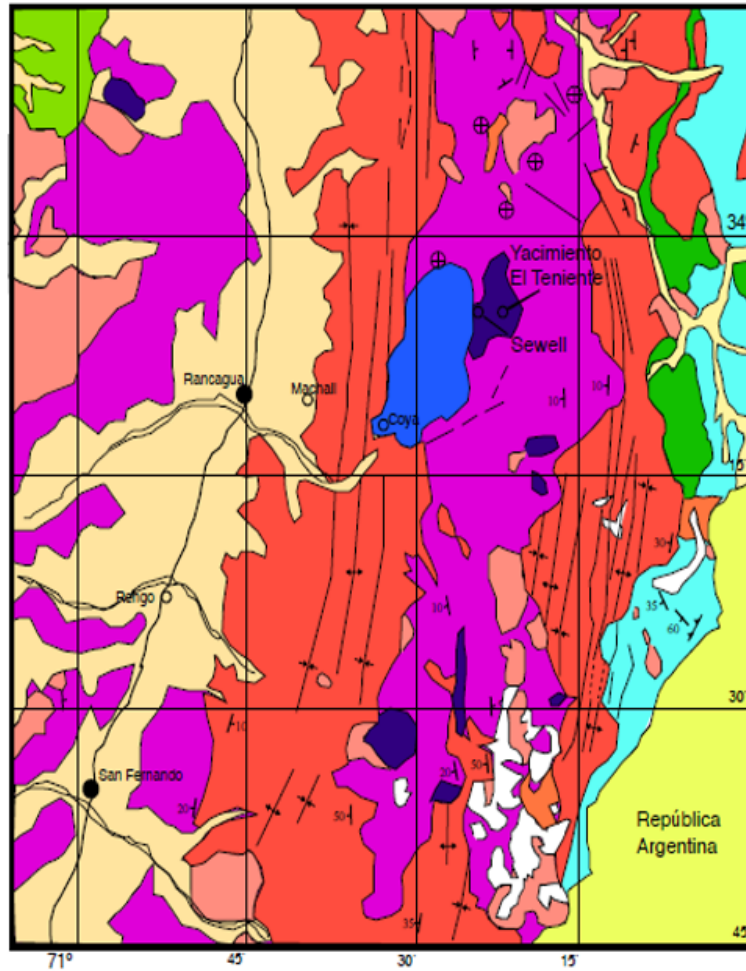
El Valle Central, que actúa como un espacio divisorio entre la Cordillera de los Andes y la Cordillera de la Costa hacia el oeste, constituye una depresión con orientación norte-sur. Y en esta región, prevalecen los depósitos sedimentarios de la era Cuaternaria. Cabe destacar que en el sector de estudio, este valle recibe el nombre de Cuenca de Rancagua [Fuenzalida, 1967].

La Cordillera de la Costa se conforma por estratos de rocas sedimentarias y volcánicas que se originaron en el Paleozoico Tardío [Encinas et al., 2021]. Además, ha sido influenciada por la intrusión de un batolito, el cual ha experimentado una historia compleja de deformación. Esta cordillera posee un ancho variable de unos 40 a 60 km, con alturas máximas de 2000 m.s.n.m. frente a Santiago y Rancagua (Altos de Talamí y Antos de Cantillana).

La Plataforma Litoral es una planicie de 110 km de largo por 4 a 18 km de ancho, que

posee altitudes que van desde los 140 m en la base de la Cordillera de la Costa hasta los 80 m en el borde del acantilado costero [Encinas et al., 2021]. Esta planicie data del Mioceno Inferior, producto de la erosión marina, la que posteriormente fue cubierta por sedimentos marinos fosilíferos del Mioceno Medio a Superior.

Litológicamente, la zona montañosa de Chile Central, ubicada entre los 33°45' - 34°45' de latitud sur, está mayormente conformada por extensas capas de rocas volcánicas alternadas con estratos marinos y continentales (Figura 2.3). Estas capas se ven afectadas por la intrusión de cuerpos plutónicos e hipabisales de la era Cenozoica, y estas unidades meso-cenozoicas representan la manifestación del Ciclo Orogénico Andino, según lo descrito por Giehm [1960].



(a) Mapa

**LEYENDA**

- Relleno Cuaternario
- Lahares
- Rocas volcánicas andesíticas y traquiandesíticas
- DISCORDANCIA
- Formación Farellones
- DISCORDANCIA
- Formación Coya-Machali
- DISCORDANCIA
- Formación Colimapu
- Formación Veta Negra y Lo Prado, indiferenciados
- Formaciones Baños del flaco, Leñas Espinoza, Río Damas, Nacientes del Teno, indiferenciados
- Alteración hidrotermal
- Granitoides

**SIMBOLOGÍA**

- Rumbo y Manteo
- Estratos horizontales
- Sinclinal
- Anticlinal
- Falla
- Falla normal
- Falla inversa
- Contacto geológico
- Contacto geológico aproximado
- Carretera Panamericana
- Laguna
- Glaciales
- Ciudades
- Pueblos

(b) Leyenda

Figura 2.3: Mapa de geología regional. Extraído de Faúndez, 2001.



### 2.1.1. Rocas estratificadas

Las formaciones en la zona de estudio, desde las más antiguas hasta las más recientes, han sido definidas por Giehm [1960], Charrier [1981], y más tarde por González [2008].

- **Formación Nacientes del Teno (Bajociano-Kimmeridgiano Inferior):** Con poca presencia en la zona del yacimiento, Giehm [1960] las describe como rocas sedimentarias clásticas que se depositaron durante el ciclo marino Bajociano-Kimmeridgiano Inferior. Estas rocas son identificables en la parte oriental de la región (Figura 2.3), y la localidad tipo se ubica en la Hoya Hidrográfica del Río Teno. Según la clasificación de Davidson y Vicente [1973], la Formación Nacientes del Teno consta de dos miembros: el Miembro Superior Evaporítico, con un espesor que varía de 500 a 600 metros y disminuye gradualmente hacia el este, y el Miembro Inferior Detrítico y Calcáreo. Esta formación se sitúa concordante a la Formación Río Damas.
- **Formación Río Damas (Kimmeridgiano Superior-Titoniano Inferior):** Definida por Giehm [1960], la Formación Río Damas está compuesta por rocas sedimentarias clásticas de origen continental y depósitos volcánicos gruesos. Estos materiales representan la culminación de un ciclo regresivo y se depositaron en un entorno continental durante el Kimmeridgiano Superior y el Titoniano Inferior. Esta formación se distribuye como una franja de orientación norte-sur en el margen oriental de la región (Figura 2.3). Su desarrollo más significativo se observa en la zona del Río Damas, alcanzando un espesor promedio de 3,000 metros. La Formación Río Damas se deposita concordantemente sobre la Formación Nacientes del Teno y subyace, en concordancia, a la Formación Baños del Flaco. Además, en contacto por falla, limita con la Formación Leñas-Espinoza, según lo detallado por Charrier [1981].
- **Formación Leñas-Espinoza (Kimeridgiano Superior-Titoniano Inferior):** definida por Giehm [1960] y posteriormente por Charrier [1981], se caracteriza como una secuencia de rocas sedimentarias detríticas y calcáreas de naturaleza transgresiva, con un espesor de aproximadamente 1,200 metros. Estas rocas se encuentran distribuidas en afloramientos orientales limitados, con una disposición mayormente en dirección norte-sur, como se muestra en la Figura 2.3. Las interacciones con otras formaciones se describen de la siguiente manera: el límite inferior de la Formación es desconocido, mientras que en su parte superior presenta una transición gradual hacia la Formación Baños del Flaco. Discordantemente, se vincula con la Formación Coya-Machalí, y en algunos lugares, establece un contacto por falla con la Formación Río Damas, considerada como contemporánea.
- **Formación Baños del Flaco (Titoniana-Neocomiana):** Giehm [1960] la caracteriza como una secuencia de rocas sedimentarias marinas con intercalaciones detríticas y volcánicas. Posteriormente, Charrier [1981] asigna a esta formación los Estratos Superiores de la Formación Leñas-Espinoza previamente definida por Giehm [1960]. La

localidad tipo de esta formación se ubica en el sector de Baños del Flaco, situado en el valle del Río Tinguiririca, y su espesor promedio se estima en alrededor de 1,000 metros. En la región, la distribución de la Formación Leñas-Espinoza está limitada a pequeños afloramientos con orientación norte-sur, truncados hacia el norte por lavas provenientes de un complejo volcánico más reciente, como se muestra en la Figura 2.3. Esta formación sobryace concordantemente a la Formación Río Damas e infrayace concordantemente a la Formación Colimapu. Localmente, su techo presenta signos de erosión y está cubierto de manera discordante por la Formación Coya-Machalí. En general, la Formación Leñas-Espinoza exhibe una intensa deformación, según lo indicado por Charrier [1981]. Los depósitos marinos de esta formación se relacionan con el segundo ciclo de trasgresión-regresión que abarcó la Cordillera Principal. Estas características se repiten a lo largo de todo el margen occidental de la Cordillera Principal, donde la Formación recibe diferentes nombres, como Formación Lo Valdés en el sector metropolitano [Thiele, 1980], y Formación San José [Aguirre, 1961], en el área del Río Aconcagua.

- **Formación Colimapu (Barremiano-Albiano):** Giehm [1960] define la Formación denominada con el mismo nombre en la quebrada correspondiente como un conjunto de rocas estratificadas de naturaleza continental. Esta secuencia se dispone concordantemente, con una transición gradual sobre la Formación Baños del Flaco, mientras que en la parte superior, se observa localmente cubierta de manera discordante por la erosión bajo estratos de la Formación Coya-Machalí.

La Formación se compone de dos miembros distintos: el Miembro Inferior Sedimentario, que está principalmente formado por areniscas finas epiclásticas y calizas de tipo micrítico, con un espesor de 1,500 metros; y el Miembro Superior Volcánico, compuesto por tobas lítico-cristalinas, depósitos de lapilli e ignimbritas, con una potencia de 1,600 metros [Charrier, 1981].

Los depósitos de esta formación se originaron durante el segundo ciclo sedimentario continental, asociado a una fase de levantamiento durante el Barremiano-Albiano, que culmina con una fase plegada de las unidades del Senoniano en la fase Sub-Hercínica [Charrier, 1981].

- **Formación Coya-Machalí (Eoceno Superior-Mioceno Inferior):** Giehm [1960] la define como un conjunto de rocas volcánicas continentales, tanto efusivas como piroclásticas, de naturaleza ácida, con algunas intercalaciones de sedimentos lacustres. La localidad tipo se encuentra en la vertiente norte de la actual Cordillera Principal, entre los pueblos de Machalí y Coya, al este de la ciudad de Rancagua. Esta formación se presenta en dos franjas con orientación norte-sur: una oriental y otra occidental, separadas por afloramientos de la Formación Farellones Charrier et al. [1994] (Figura 2.3). La franja occidental está compuesta por lavas afaníticas, porfídicas y microfaneríticas de composición andesítica, mientras que la franja oriental contiene rocas piroclásticas con notables intercalaciones de sedimentitas finas [Charrier et al., 1994] [Charrier y Muni-zaga, 1979]. Se estima que su espesor alcanza los 3,200 metros.

Correlacionable con la Formación Abanico, esta formación se superpone discordantemente sobre las formaciones Baños del Flaco, Leñas-Espinoza, Río Damas y Nacientes del Teno, e infrayace en discordancia angular a la Formación Farellones. Las dataciones radiométricas  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  y la información proporcionada por la fauna fósil encontrada cerca de los niveles basales de la formación indican una edad desde el Eoceno Superior hasta el Mioceno Inferior para los niveles superiores [Charrier et al., 1994].

- **Formación Farellones (Mioceno Superior):** Una robusta secuencia con un espesor mínimo de 2400 metros, principalmente de naturaleza volcánica, comprende lavas de composición intermedia a ácida y rocas piroclásticas. En esta secuencia, se intercalan sedimentos lagunares como areniscas, lutitas, tufitas, y delgadas capas de caliza. Estas rocas se encuentran suavemente plegadas a subhorizontales, según lo descrito por Charrier [1981], y se disponen en discordancia angular sobre la Formación Coya-Machalí. Localmente, la Formación Colorado-La Parva [Thiele, 1980] la cubre. Los afloramientos de esta formación exhiben una distribución en dirección norte-sur y están limitados hacia el este y oeste por la Formación Coya-Machalí (Figura 2.3). La formación se atribuye a una intensa actividad volcánica, predominantemente andesítica, centrada a lo largo de la franja actual de afloramientos. Las dataciones de K-Ar sitúan a esta formación en el Mioceno Medio y Superior [Charrier, 1981].

### 2.1.2. Rocas intrusivas

Se trata de cuerpos intrusivos de naturaleza plutónica e hipabisal, con composición, textura y dimensiones variables, que afloran en la región donde se encuentra el yacimiento, siguiendo una alineación norte-sur e intruyendo a las formaciones del Mioceno. Estos cuerpos comprenden granodioritas de hornblenda y biotita, pórfidos diorítico-andesíticos, monzonitas, monzodioritas y pórfidos dacíticos, presentándose en diversas formas como stocks, batolitos, grandes filones y cuerpos menores como diques, filones y apófisis [Charrier, 1981].

Con respecto a la edad de estos cuerpos intrusivos, Stewart y Araya [1972] los asignan como relativamente posteriores a la Formación Farellones, mientras que Godoy y Köeppen [1993] propone una edad Mioceno. No obstante, las dataciones radiométricas  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  realizadas por Kurtz et al. [1997] proporcionan un rango de edad entre 34.3 a 5.5 millones de años para los intrusivos de la zona. Según estas dataciones, Kurtz et al. [1997] sugieren que la actividad magmática en este sector se extendió desde el Oligoceno Superior hasta el Mioceno Superior, coincidiendo con los intervalos establecidos para las formaciones Abanico y Farellones.

Basándose en las dataciones mencionadas, se identifican tres complejos plutónicos distintos:

- Complejo Plutónico Antiguo: Datado en  $21,6 \pm 4,9$  y  $16,2 \pm 1,2$  millones de años, correspondiente a intrusivos del Mioceno Inferior.

- Complejo Plutónico Teniente: Subdividido en dos unidades, el primero con una edad de 12 millones de años ( $12,4 \pm 2,5$  y  $11,3 \pm 0,3$  millones de años, Mioceno Medio), y el segundo con una edad estimada de 8 millones de años ( $8,8 \pm 0,1$  y  $7,7 \pm 0,1$  millones de años, Mioceno Superior).
- Complejo Plutónico Joven: Datado en  $6,6 \pm 0,1$  millones de años y  $5,5 \pm 0,2$  millones de años, correspondiente a intrusivos de edad Mioceno Superior.

### 2.1.3. Estructuras

A nivel regional, los rasgos geológicos de Chile Central, ubicados entre los  $33^\circ$  y  $39^\circ$  de latitud sur, parecen estar vinculados con estructuras de orientación NW y NNW que surgieron a raíz de eventos tecto-magmáticos en el Paleozoico-Mesozoico [Godoy y Lara, 1994]. Estas estructuras delimitarían segmentos tectónicos dispuestos de manera oblicua respecto a la actual cadena Andina, experimentando reiteradas reactivaciones durante el Mesozoico-Cenozoico [Rivera y Cembrano, 2000]. Se sugiere que los movimientos laterales asociados con estas reactivaciones podrían explicar la distribución de franjas de centros volcánicos e intrusivos del Mioceno en la región [Falcón y Rivera, 1998].

A nivel regional, se plantea que los eventos tectónicos fueron influenciados por una zona de transcurrencia sinistral de orientación  $N50^\circ W$ , coincidiendo con la Zona de Falla Río Blanco-Codegua. Según un sistema Riedel, esto habría generado fracturas sintéticas-sinestrales (tipo R) con orientación  $N60^\circ W$  y fracturas antitéticas-dextrales (tipo R') con orientación  $N50^\circ E$  [Falcón y Rivera, 1998].

Dentro de las estructuras en la región se logran reconocer:

- **Pliegues:** Se identifican anticlinales y sinclinales en la descripción de Giehm [1960] y Charrier et al. [1994]. Estas estructuras muestran ejes con una orientación general nortesur, con un suave inclinación hacia el sur. Pueden presentar pequeñas inflexiones en el rumbo, variando desde  $N30^\circ W$  hasta  $N30^\circ E$  (Figura 2.3). La continuidad longitudinal de estas estructuras se observa únicamente entre segmentos definidos por el sistema de fallas  $N30^\circ W$  [Rivera y Cembrano, 2000].

En el área donde se ubica el Yacimiento El Teniente, estos pliegues se manifiestan en un estilo de plegamiento suave, representado por anticlinales y sinclinales con flancos cuyas inclinaciones no superan los  $30^\circ$  (con un promedio de  $10^\circ - 15^\circ$ ). Los ejes de estos pliegues tienen un rumbo predominantemente NNW-SSE a N-S, con un leve buzamiento hacia el sur y planos de vergencia suave hacia el este (Gómez, 2001). Este estilo de plegamiento afecta principalmente a las rocas de la Formación Farellones.

- **Fallas:** Falcón y Rivera [1998] identifican un sistema de fallas con orientación  $N30^\circ W$  (Figura 2.3), compuesto por siete zonas de falla que se extienden tanto en la Cordillera

de la Costa como en la de los Andes.

En la Depresión Intermedia, la acumulación sedimentaria moderna tiende a borrar la traza de estas estructuras. Dentro de este sistema, alrededor del Yacimiento El Teniente, destacan las zonas de falla Piuquencillo al norte, El Azufre en el centro y Juanita al sur [Rivera y Cembrano, 2000], las cuales cortan los ejes de plegamiento de la Formación Farellones.

También es relevante mencionar las fallas descritas por Charrier [1981], quien identifica fallas inversas en la franja oriental de la Formación Coya-Machalí. Estas fallas se ven favorecidas por la presencia de intercalaciones de roca incompetente. Además, se observa la presencia de fallas normales con desplazamientos verticales, asociadas a la tectónica de bloques Plio-Cuaternaria, resultado del levantamiento andino.

## 2.2. Geología del yacimiento

Con una extensión de tres kilómetros de largo por dos kilómetros de ancho y una profundidad vertical de aproximadamente dos mil metros, el yacimiento se clasifica como un "Pórfido Gigante" [Sillitoe y Perelló, 2005].

En el distrito geológico, predominan las rocas volcánicas del Mioceno, representadas principalmente por la Formación Farellones, y junto con la presencia de minerales de cobre y molibdeno, sugiere un origen complejo vinculado a una evolución geológica causada por la intrusión de cuerpos subvolcánicos de composiciones máficas y félsicas [Sillitoe y Perelló, 2005]. Estos cuerpos están estrechamente asociados con brechas magmáticas e hidrotermales. En la zona del yacimiento, la Formación Farellones experimenta intrusiones primero por las rocas del Complejo Máfico El Teniente y luego por cuerpos félsicos relativamente pequeños [Skewes et al., 2002].

Las rocas volcánicas, que incluyen capas estratificadas de origen volcánico, volcánico-sedimentario, continental y piroclástico, abarcan un área aproximada de 675 kilómetros cuadrados. Las rocas de origen extrusivo presentes en la zona consisten en una secuencia de coladas de lava que van desde composiciones basálticas hasta riolíticas, así como también rocas volcanoclásticas [Maksaev et al., 2005]. Por su parte, en la zona del depósito, hay dos grandes plutones félsicos que intruyen las rocas máficas existentes en el área. Estos plutones se conocen como la Diorita Sewell y el Pórfido El Teniente, ambos presentando brechas hidrotermales [Cuadra, 2010]. En una etapa posterior, se forma la chimenea de Brechas Braden, la cual interrumpe abruptamente la evolución normal del sistema hidrotermal y marca el colapso y el final del proceso de formación del yacimiento [Maksaev et al., 2005].

### 2.2.1. Unidades litológicas

Dentro del yacimiento, la Formación Farellones es cortada e instruida por las siguientes unidades litológicas (Figura 2.4):

- **Complejo Máfico El Teniente (CMET):** es la unidad principal del yacimiento. Bajo la denominación de CMET se agrupan diversas rocas oscuras del Mioceno Superior [Charrier et al., 1994]. Este complejo constituye un conjunto subvolcánico con composición básica y afinidad toleítica [Skewes et al., 2002], englobando gabros, diabasas, pórfidos basálticos e incluyendo brechas de biotita [Skewes et al., 2002]. Este complejo se extiende verticalmente por más de 2 km, intruyendo en forma de lacolito a la Formación Farellones [Munizaga et al., 2002].

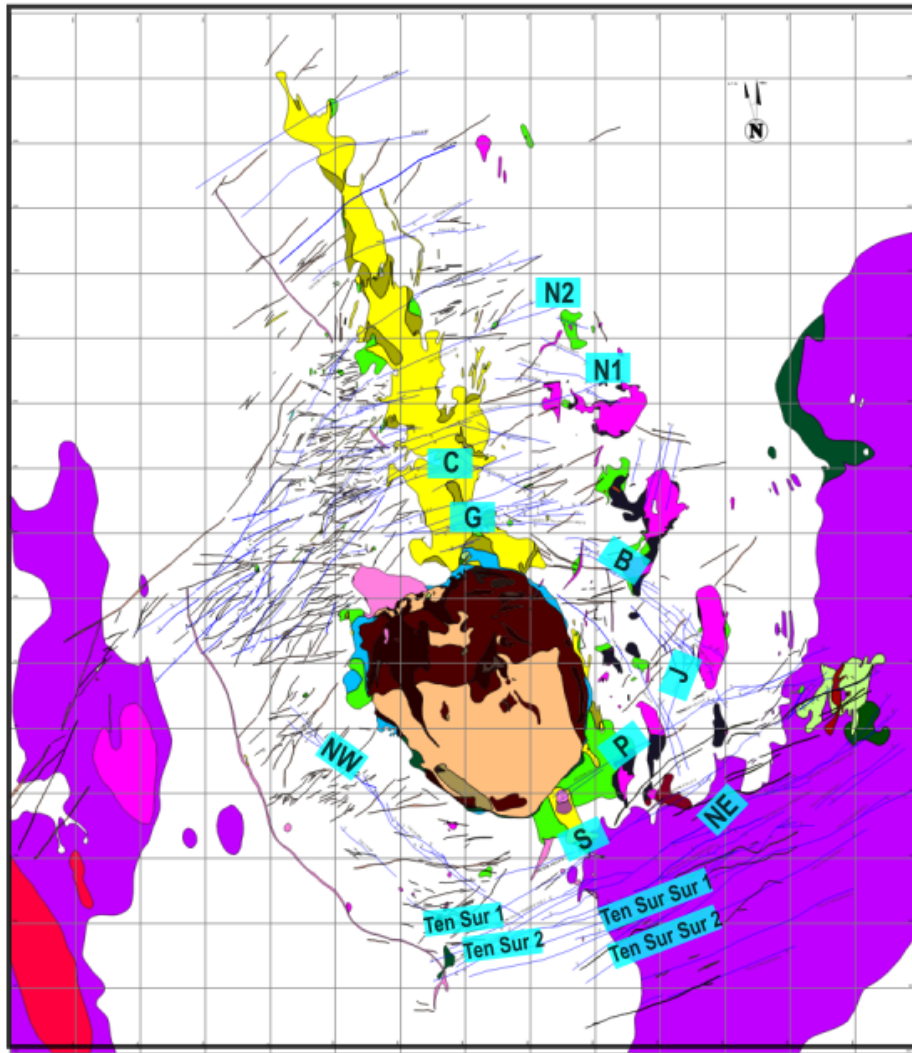
CMET muestra una alteración generalizada de biotita potásica cortada por vetas de cuarzo-sericita o cuarzo-calcopirita. Las discontinuidades reconocidas son principalmente fallas muy espaciadas y un stockwork formado por una red de alta frecuencia de pequeñas vetas caracterizadas por una resistencia a la tracción intermedia a alta. Cabe destacar, que las propiedades mecánicas de las muestras de roca intacta de CMET según bibliografía entregan que en promedio la densidad es 2.82 g/cm<sup>3</sup>, el módulo de Young es  $35.2 \pm 5.4$  GPa y el valor de Poisson es  $0.22 \pm 0.04$  [Turichshev y Hadjigeorgiou, 2016], UCS de 121,5 MPa, cohesión igual a 24 MPa y ángulo de fricción interna de 43° [GRMD, 2018]. Aproximadamente el 80 % de la mineralización de cobre está alojada en esta roca [Brzovic et al., 2015].

Cabe destacar que CMET está constituido por 3 unidades litológicas (gabro, diabasa y pórfido basáltico). La diferencia entre estas unidades es principalmente textural, por tanto, cabe destacar que su reconocimiento al interior mina es de alta complejidad.

- **Pórfido Dacítico:** Anteriormente conocido como Pórfido Teniente, Dacita Porfídica o simplemente Dacita, este cuerpo se presenta como un intrusivo tabular, subvertical y con orientación predominante norte-sur, localizado en la parte septentrional del yacimiento (Figura 2.4). Este intrusivo penetra al Complejo Máfico El Teniente, mostrando contactos nítidos e irregulares, ya sean brechosos o de transición. Hacia el sur, la Chimenea Braden trunca el cuerpo, generando un contacto donde se desarrolla una brecha que contiene fragmentos del pórfido y matriz de turmalina.

El Pórfido Dacítico exhibe tonalidades que van desde gris claro hasta blanco, y se distinguen dos variedades texturales: la porfídica idiomorfa y la porfídica hipidiomorfa [Osandón, 1974]. Presenta fenocristales de oligoclasa, biotita y cuarzo [Cárdenas, 1986]. Datos de edades U/Pb en circón indican que la cristalización del intrusivo tuvo lugar hace aproximadamente  $5,28 \pm 0,10$  millones de años [Maksaev et al., 2005].

- **Tonalita:** Además identificada como Diorita Sewell [Skewes et al., 2002], esta formación se manifiesta en la porción sureste del yacimiento (Figura 2.4) como un extenso cuerpo intrusivo que penetra el Complejo Máfico El Teniente. Se trata de un stock con una extensión de aproximadamente 200 m<sup>2</sup>, localizado en la porción sureste de la pipa Braden, y presenta un núcleo fanerítico que transiciona a una textura porfídica en la periferia del intrusivo [Faunes, 1981].
- **Pórfido dióritico:** Se presenta como una serie de stocks y diques menores alineados en dirección N30°W en la porción norte y central del yacimiento. Estos últimos, conocidos anteriormente como Diorita Central (Figura 2.4), muestran una extensión significativa en la vertical. Las dataciones radiométricas U/Pb en circón señalan una edad de cristalización del intrusivo en el rango de 6,11 ± 0,13 Ma a 6,28 ± 0,16 Ma [Maksaev et al., 2005].
- **Brecha Braden:** Se trata de una chimenea volcánica, también conocida como pipa, originada por la salida explosiva de gases que fragmentan y quiebran la roca de la caja, llenando el conducto con fragmentos angulosos. La forma de esta chimenea es semejante a un cono invertido subcircular, con un diámetro de 1200 m y una extensión en profundidad reconocida de más de 2150 m desde la superficie (a 3140 m sobre el nivel del mar). Se estima que la edad de la Chimenea es cercana a la fase tardimagmática del yacimiento, situándose en un rango de 4,7 a 4,5 millones de años [Cuadra, 2010]. Su flanco este es prácticamente vertical, mientras que los restantes sectores presentan una inclinación de 60° a 70° hacia el centro de la chimenea.



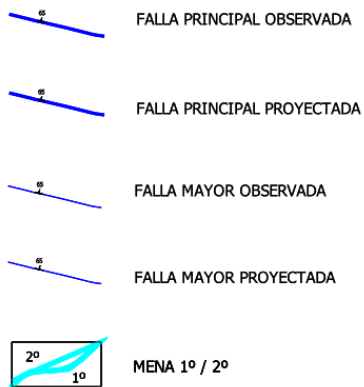
(a) Mapa

LITOLOGIA



(b) Litología

ESTRUCTURAS



(c) Estructuras

Figura 2.4: Mapa geológico del nivel 1983 del yacimiento. Facilitado por CODELCO, El Teniente. Con nombres de fallas principales en recuadros celestes.



## 2.2.2. Estructuras del yacimiento

Howell y Molloy (1960), presentan los primeros antecedentes estructurales para el Yacimiento el Teniente. Estos autores señalan que se emplaza dentro de una zona de deformación de forma tabular de aproximadamente 10 km de largo, caracterizada por fallas y vetas de orientación noreste.

Dentro del yacimiento se reconocen grupos de fallas, vetas de cuarzo, vetas-fallas y diques basálticos, los cuales exhiben diferentes geometría y orientación espacial a diversas escalas. Las fallas del yacimiento El Teniente se dividen en estructuras principales y secundarias, clasificadas según su persistencia (Tabla 2.1). Las Fallas principales de la Mina se definen como aquellas estructuras geológicas que atraviesan toda o parte importante del sector productivo, con longitudes mayores a 100 m. y las Fallas Secundarias son las que poseen longitudes menores a 100 m.

Tabla 2.1: Clasificación sistemas de Falla de acuerdo a División El Teniente [GRMD, 2014].

Tipo de Falla	Clasificación	Persistencia (m)
Principales	Distrital	>1000
	Maestra	500-1000
	Mayor	100-500
Secundarias	Intermedia	4-100
	Menor	<4

A nivel distrital, en el área cercana a la mina y en afloramientos de superficie, predominan fallas mayores subverticales con una orientación NE-SW y con geometrías de tipo dúplex. Este patrón es similar al observado en las operaciones mineras. La intrusión de la Brecha Braden, que tuvo lugar hace aproximadamente 4.8 millones de años, generó un sistema sub-circular que se superpone a la orientación principal NE-SW. Este fenómeno es más evidente en los bordes de la Brecha Braden. La deformación está limitada hacia el oeste por el bloque rígido del cerro El Durazno. Hacia el este y norte, la deformación desaparece bajo capas de rocas volcánicas más jóvenes que se disponen de forma estratificada [Seguel et al., 2007].

Estas fallas están asociadas a una evolución del régimen tectónico durante la actividad magmática-hidrotermal del depósito partiendo desde un régimen tectónico transpresivo hasta un régimen tectónico compresivo durante el Mioceno-Plioceno [Piquer et al., 2016].

Las características geométricas, cinemáticas y mineralógicas de las Fallas Principales de El Teniente se resumen en la tabla de la Figura 2.5, las mismas que están localizadas en el mapa de la figura 2.4. Estas estructuras incluyen fallas de orientación NW y NE, y largos entre 100 y 780 m (Fallas N1, N2, C, G, B, J, P, S, y Teniente Sur).

Fallas	Tamaño				Orientación espacial		Cinemática {1}{2}	Material de relleno {1}{3}	Rugosidad {3}
	Persistencia [m] {3}	Extensión vertical[m]	Espesor [cm] {3}		Rumbo típico {3}	Manteo típico {3}			
			Típico	Rangos					
Falla N1	780	490	5.5	[1-60]	N70°-80°E	83°SE	Rumbo Sinestral (transpresivo)	Salbanda (35%) Anhidrita (37%) Carbonato (18%)	Ondulosas- Lisas
Falla P	700	470	4	[1-35]	N60°-70°E	83°NW	SIN INFORMACIÓN	Salbanda (6%) Anhidrita (40%) Carbonato (23%) Clorita (6%) Yeso (26%)	Ondulosas- Lisas
Falla B	650	390	3	[1-30]	N40°-60°E	68°-80°NE	SIN INFORMACIÓN	Salbanda (16%) Anhidrita (20%) Carbonato (14%) Yeso (23%) Molibdenita (26%)	Ondulosas- Rugosas
Falla N2	600	350	5	[1-10]	N69°E	75°SE	Rumbo Sinestral	Anhidrita (43%) Yeso (33%)	Ondulosas- Rugosas
Falla G	500	314	2	[1-15]	N°75-85°E	85°NW	SIN INFORMACIÓN	Anhidrita (48%) Carbonato (33%)	Ondulosas- Lisas
Falla S	390	230	3	[1-10]	N60°-75°E	80°NW	Rumbo dextral	Salbanda (10%) Anhidrita (50%) Yeso (27%)	Ondulosas- Rugosas
Falla C	380	210	2.5	[1-20]	N°75-85°E	70°NE	SIN INFORMACIÓN	Anhidrita (40%) Carbonato (30%) Yeso (13%) Molibdenita (10%)	Ondulosas- Rugosas
Falla J	330	200	5	[3-10]	N°00-N5°E	65°NE	SIN INFORMACIÓN	Anhidrita (30%) Carbonato (23%) Yeso (33%) Cuarzo (7%)	Ondulosas- Lisas
Falla Ten Sur 2	246	150	1.1	[0.5-12]	N50°-70°E	77°NW	SIN INFORMACIÓN	Anhidrita (18%) Yeso (49%)	Ondulosas- Rugosas
Falla Ten Sur 1	210	165	1.3	[0.6-12]	N50°-70°E	78°NW	SIN INFORMACIÓN	Anhidrita (49%) Yeso (49%)	Ondulosas- Rugosas
Falla Ten Sur Sur 1	160	150	1.1	0.2-8	N50°-60°E	78°SE	SIN INFORMACIÓN	Anhidrita (18%) Yeso (23%)	Ondulosas- Rugosas
Falla NW	150	115	1	[0.5-8]	N35°-55°W	78°NW	SIN INFORMACIÓN	Anhidrita (47%) Yeso (32%)	Ondulosas- Lisas
Falla NE	120	115	1	[0.5-3]	N60°-70°E	80°NE	SIN INFORMACIÓN	Salbanda (9%) Anhidrita (26%) Carbonato (39%) Yeso (17%) Calcopirita (10%)	Planas- Lisas
Falla Ten Sur Sur 2	100	150	1.2	[0.2-8]	N50°-60°E	77°SE	SIN INFORMACIÓN	Anhidrita (38%) Yeso (23%)	Ondulosas- Lisas

Figura 2.5: Características de Fallas Principales de la mina El Teniente. Referencias: (1) Seguel, 2013 (GRMD-SGL-I-070-2013), (2) Seguel et al., 2015 y (3) Estándares y Metodologías de trabajo para Geología de Minas. \*El material de relleno se estima en base a descripción de mano realizada por la división El Teniente.

# Capítulo 3

## Marco teórico

### 3.1. Propiedades friccionales

Generalmente se acepta que los terremotos de la corteza son causados por movimientos repentinos en fallas preexistentes. Por lo tanto, la comprensión del deslizamiento por fricción entre las rocas es un requisito previo importante para la comprensión de los mecanismos sísmicos. [Byerlee, 1978]

En las últimas décadas, las propiedades de fricción de las rocas se han investigado durante mucho tiempo utilizando aparatos triaxiales en configuración de corte de sierra (p.j., J. Jaeger [1959]; Byerlee [1967]), en el que la falla se carga a bajas velocidades, típicamente en orden de  $\mu\text{m/s}$ , y acumula pequeños desplazamientos, típicamente de pocos mm. En un artículo seminal, Brace y Byerlee [1966] sugieren que el fenómeno stick-slip observado en estos experimentos de fricción de rocas es análogo a los terremotos naturales.

La figura 3.1 muestra un diagrama esquemático de un experimento típico. Un objeto de masa  $m$  desliza por un plano rígido, y la fuerza requerida para mover la masa se aplica a través del resorte AB, el cual se mueve a una velocidad  $V$ . Si la fuerza del resorte se grafica en función del desplazamiento del punto B se obtiene una curva como la de la figura 3.2.

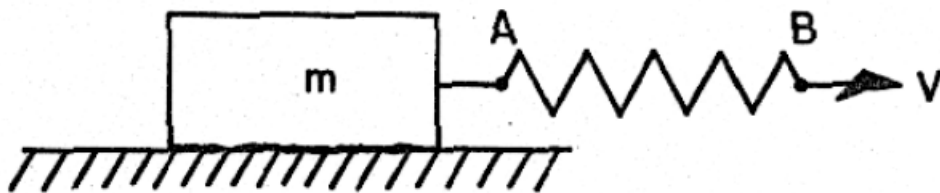


Figura 3.1: Diagrama esquemático de un experimento típico de fricción. Imagen extraída de Byerlee (1978).

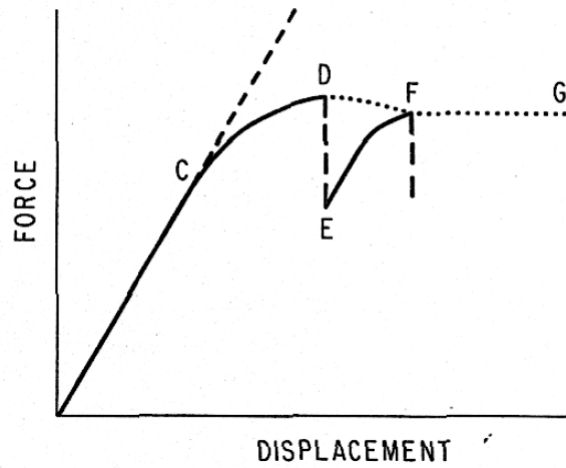


Figura 3.2: Diagrama esquemático de la fuerza de fricción representada en función del desplazamiento del objeto. Imagen extraída de Byerlee (1978).

La fuerza en los puntos C, D y G se conocen como inicial, máxima y residual respectivamente. Habrá un aumento inicial de la fuerza elástica hasta el punto C donde la curva se aparta de una línea recta. En el punto D se alcanza un máximo y luego la fuerza en el resorte caerá repentinamente hasta el punto E. La fuerza aumentará nuevamente hasta que el resbalón repentino ocurra una vez más en el punto F. Este repentino tipo espasmódico de movimiento se conoce como *stick-slip* [Byerlee, 1978].

Cabe destacar que en este caso, es extremadamente difícil determinar el punto exacto en el que la curva de desplazamiento de la fuerza se vuelve no lineal, por lo que la determinación de la fricción inicial está sujeta a un error [Byerlee, 1978].

Para efectos de este trabajo, fricción ( $\mu$ ) se define como  $\mu = \tau/\sigma_n$ , donde  $\tau$  es el esfuerzo cortante y  $\sigma_n$  el esfuerzo normal, los cuales actúan sobre la superficie durante todo el deslizamiento.

Aunque en algunos experimentos, se observa que el esfuerzo cortante se aproxima bastante a la línea  $\tau = A + B\sigma_n$  con A y B constantes Byerlee [1978].

Otra definición es la de Lockner y Beeler [2002]:

$$\mu = \frac{\tau - \tau_o}{\sigma_n} \quad (3.1)$$

donde  $\tau_o$  corresponde a una resistencia de corte “inherente” o cohesión.

Notar que esta última ecuación (3.1) corresponde a  $\tau = \mu\sigma_n + \tau_o$ , la que puede utilizarse con el criterio de Mohr Coulomb, donde  $\tau_o$  sería la cohesión del material (Figura 3.3).

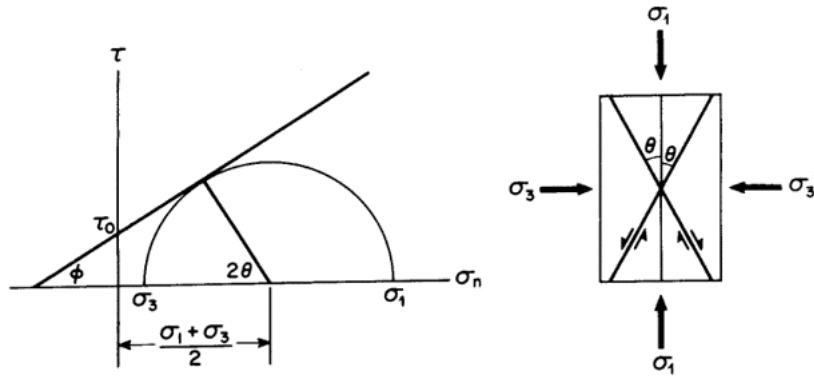


Figura 3.3: Criterio de Mohr Coulomb. Extraído de Scholz [2019].

El criterio de Mohr-Coulomb (MC) es un conjunto de ecuaciones lineales en el espacio de tensiones principales que describe las condiciones para que un material isotrópico falle, sin considerar el efecto del estrés principal intermedio ( $\sigma_2$ ). Puede expresarse en función de los esfuerzos principales ( $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ ) o en función del esfuerzo normal ( $\sigma_n$ ) y de corte ( $\tau$ ) en el plano de falla [J. C. Jaeger et al., 2009]. En la práctica, este criterio resulta conveniente por varias razones: 1) es sencillo; 2) la mayoría de los geólogos y geotécnicos están familiarizados con este criterio, por lo que poseen un “conocimiento intuitivo” respecto a valores “razonables” de la cohesión y del ángulo de fricción; 3) prácticamente todos los programas computacionales de análisis geotécnico tienen incorporado este criterio.

Hay variadas formas de estudiar la fricción, como lo es el corte directo, biaxial, doble cortante y triaxial. Si nos centramos en una configuración de doble corte, se puede observar el gráfico obtenido por Orellana et al. [2018] (Figura 3.4), donde se distingue un aumento progresivo del estrés de corte, hasta que llega a un punto máximo para luego descender y llegar a un valor estacionario. Cabe destacar que en este experimento se realizaron dos pruebas importantes: Velocity Step y Slide-hold-slide, las cuales se explicarán a continuación.

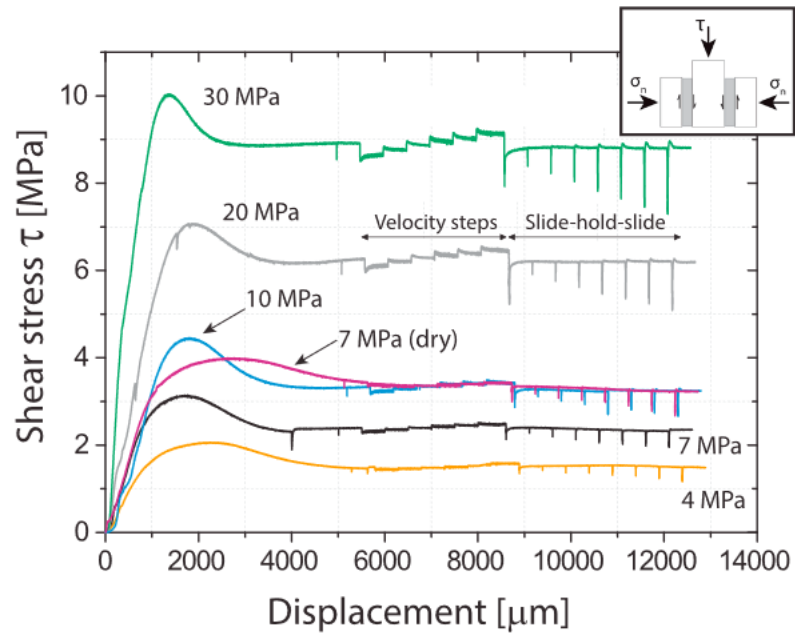


Figura 3.4: Experimentos de fricción realizados a diferentes tensiones normales (de 4 MPa a 30 MPa) en una configuración de doble corte. Orellana et. al. 2018

### 3.1.1. Velocity Step o prueba de paso de velocidad

Se provoca un cambio repentino de la velocidad de deslizamiento de una velocidad  $V_0$  a una velocidad  $V_1$ , con  $V_0 < V_1$ , lo que provoca un aumento inmediato de la fricción, seguido de una disminución exponencial en una distancia de deslizamiento crítica ( $D_c$ ), a un nuevo valor de estado estacionario de la resistencia friccional [Scholz, 2019] (Figura 3.5).

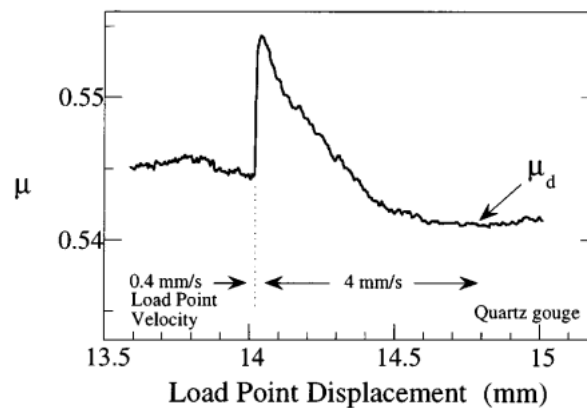


Figura 3.5: Dependencia de respuesta friccional frente a cambios de velocidad de deslizamiento. Imagen extraída de Marone [1998].

Para entender de mejor manera los resultados de la prueba de velocity step, se definen

los parámetros friccionales  $a$  y  $b$ , los que indican el valor de la fricción antes y después del cambio de velocidad, como se muestra en la figura 3.6.

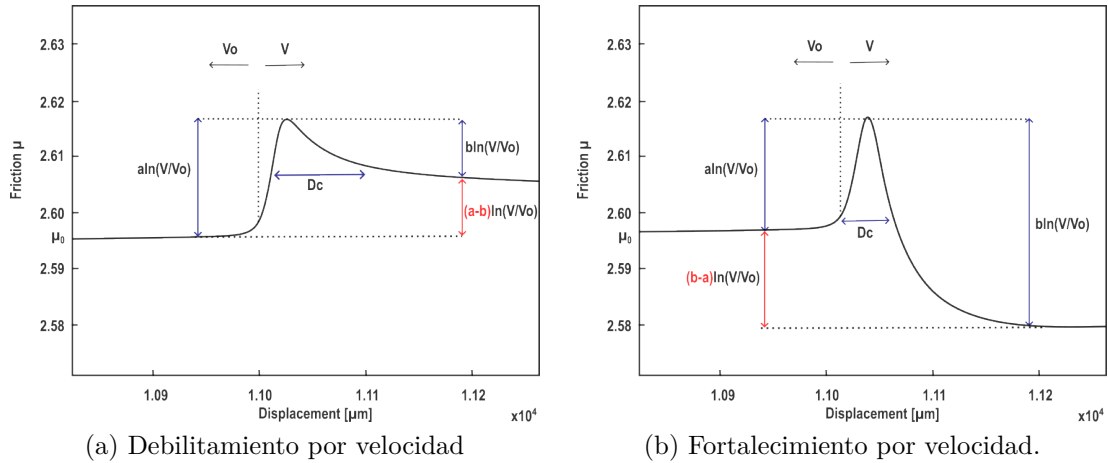


Figura 3.6: Parámetros  $a$  y  $b$  de la dependencia de la respuesta de fricción de los cambios en la velocidad de deslizamiento. Elaboración propia.

Los valores de  $a$  y  $b$  son bastante importantes a la hora de estudiar las propiedades friccionales de las rocas, pues ayudan a determinar qué tan estable es el deslizamiento a estudiar, cuando existe una dependencia de tasa neutral o positiva, es decir, cuando  $(a-b) \geq 0$ , quiere decir, que a medida que se aumenta la velocidad, aumenta la fricción, por lo que se está en una condición de fortalecimiento de la velocidad, lo que da paso a que se realice un deslizamiento estable y el material exhibe un endurecimiento con respecto a la velocidad. En cambio, si la fuerza de fricción disminuye a medida que aumenta la velocidad de deslizamiento, es decir, cuando  $(a-b) < 0$ , cualquier perturbación en la falla puede potencialmente acelerar el deslizamiento. En consecuencia, el sistema se considera potencialmente inestable y el material se describe como debilitado por la velocidad [Scholz, 2019].

### 3.1.2. Slide-hold-slide o deslizamiento-mantenimiento-deslizamiento

Experimento en que se pausa el deslizamiento por un tiempo definido y se retoma luego el experimento, con tiempos cada vez mayores de reposo, para así determinar la recuperación de la fricción (healing,  $\Delta\mu$ ) (Figura 3.7).

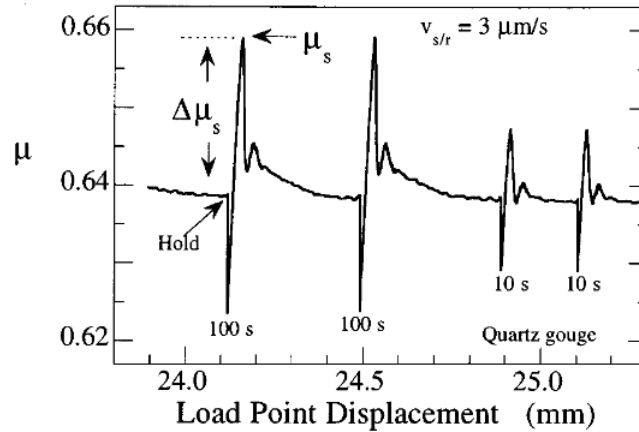


Figura 3.7: Prueba de slide-hold-slide. Imagen extraída de Marone [1998].

## 3.2. Propiedades friccionales en roca

En 1967, Byerlee habla del método triaxial, donde menciona que el coeficiente de fricción,  $\mu$ , para el granito (roca que estudia en su documento) depende del desplazamiento relativo de las superficies, y que el agua reduce la resistencia al corte por fricción del granito en alrededor de 400 bares, independientemente de la tensión normal a través de las superficies deslizantes, pero en el caso común, la fricción  $\mu$  del granito está cercana al valor de 0.6.

Con este trabajo se espera complementar el estudio de los parámetros friccionales de la roca CMET y aportar con las propiedades de 7 fallas del yacimiento. Además, se espera responder a la hipótesis de que existe un control mineralógico en las propiedades friccionales de las fallas, lo que ayudaría a ver si hay alguna condición de riesgo de la infraestructura subterránea y la operación minera, asociado a la posibilidad de reactivación y sismicidad inducida provocados por la inestabilidad de la falla.

Cabe destacar que en la literatura se ha realizado un estudio de fricciones en otras mineralogías, como lo es el caso de Carpenter et al. [2016] que realizó el estudio en calcita, donde obtuvo que la fricción aplicando un esfuerzo normal de 5 MPa se mantuvo en el rango de 0.6-0.7, con un promedio de 0.63 (Figura 3.8a). Además, en ese mismo estudio se midieron los valores de  $a$  y  $b$ , donde la diferencia ( $a-b$ ) estuvo en el rango de -0.01 y 0.02, con mayor concentración entre 0 y 0.01 (Figura 3.8b).



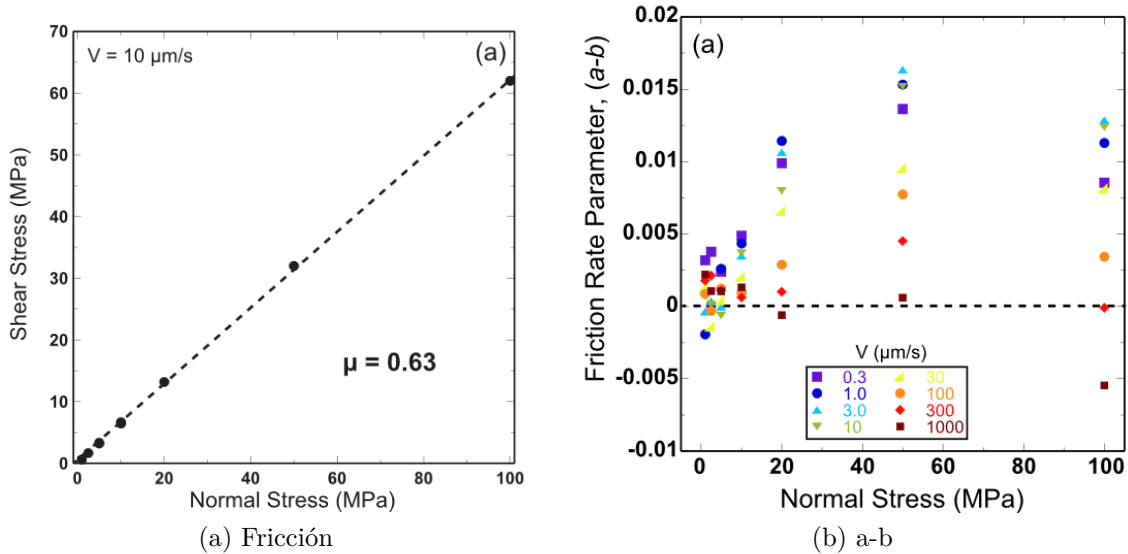


Figura 3.8: Parámetros friccionales en calcita. [Carpenter et al., 2016]

Otro artículo a destacar es el de Giorgetti et al. [2015] en el cual miden los parámetros friccionales de una mezcla de talco y calcita, obteniendo que la fricción en una prueba con esfuerzo normal de 5 MPa posee valores entre 0.3 y 0.6, siendo menores a medida que el porcentaje de talco era mayor (Figura 3.9a). Junto a esto, midieron que (a-b) se encontraba entre -0.005 y 0.01 (Figura 3.9b) y que el healing ( $\Delta\mu$ ) era mayor con un esfuerzo normal de 5 MPa (hasta 0.08) que de 50 MPa (hasta 0.01), y además mientras mayor era el porcentaje de talco en la mezcla, el healing era menor (Figura 3.9c).

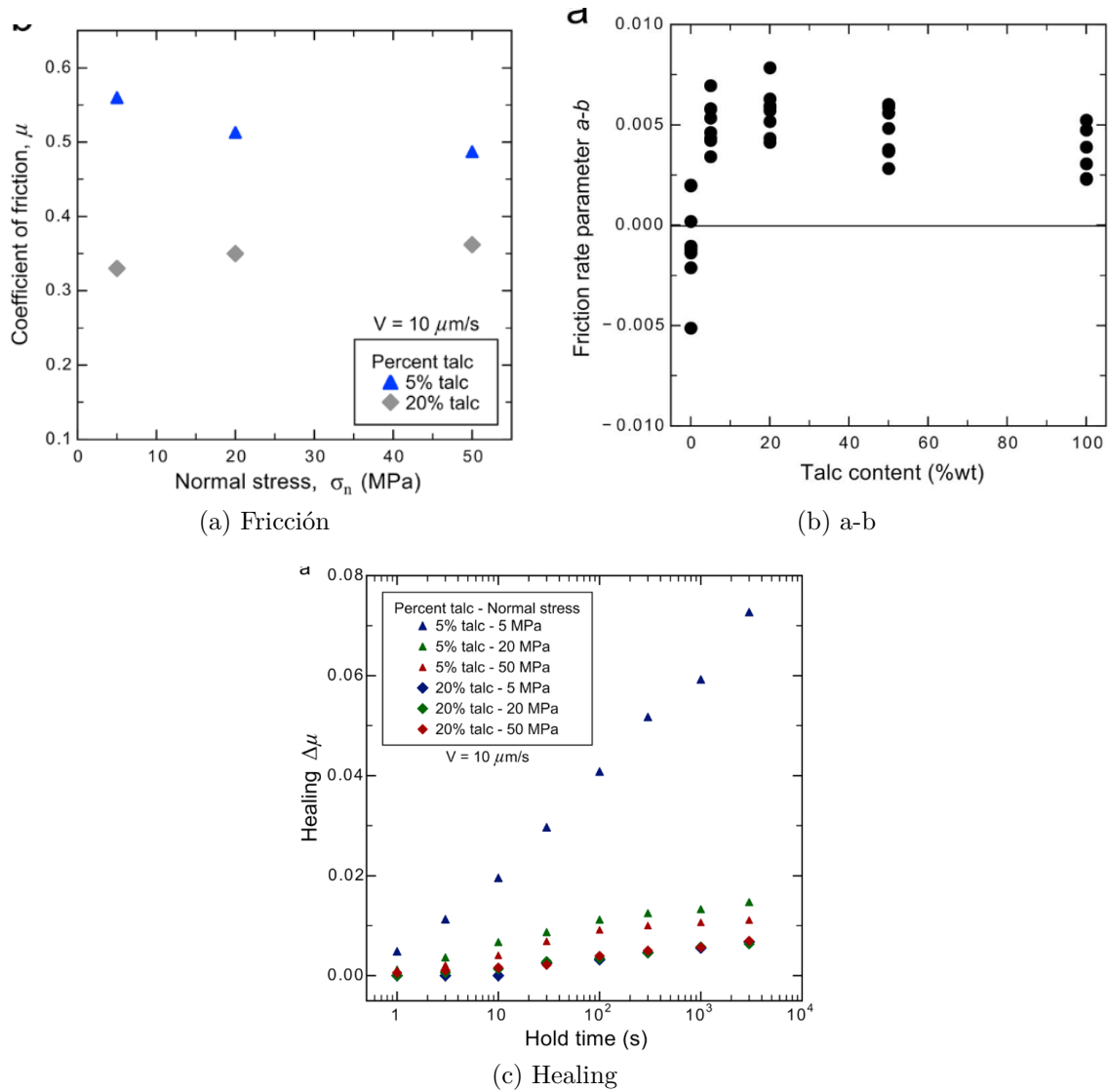


Figura 3.9: Parámetros friccionales en mezcla talco-calcita. [Giorgetti et al., 2015]

# Capítulo 4

## Metodología

En este trabajo se realizaron experimentos en dos tipos de muestras: 1) en roca triturada de CMET que simula salbanda y 2) en muestras de 7 fallas en testigos extraídos del yacimiento.

Las muestras de salbanda simulada se sometieron a grandes esfuerzos normales, que van de los 10 a los 60 MPa, en cambio, las muestras de fallas (en testigos) fueron sometidas a esfuerzos menores, los cuales van de los 2 a los 6 MPa.

### 4.1. Salbanda (*fault gouge*) simulada

Para estudiar los desprendimientos de rocas por deslizamiento de fallas, ensayamos muestras de roca pulverizada (gubia/salbanda simulada) de CMET (Complejo Máfico El Teniente) bajo tensiones similares de condiciones de minería profunda utilizando una configuración biaxial de doble corte directo.

Se analizaron 10 muestras, las cuales están resumidas en la siguiente tabla:

Tabla 4.1: Muestras CMET

Muestra	Condición	Normal stress
h282	dry	10 MPa
h284	dry	15 MPa
h281	dry	30 MPa
h299	dry	45 MPa
h283	dry	60 MPa
h285	wet	10 MPa
h296	wet	15 MPa
h287	wet	30 MPa
h298	wet	45 MPa
h288	wet	60 MPa

Siendo 5 muestras en condición seca y 5 muestras en condición húmeda, con esfuerzos normales de 10, 15, 30, 45 y 60 MPa respectivamente.

Antes de comenzar, hay que considerar que con el análisis de difracción de rayos X (XRD) realizado se obtiene que la mineralogía de las muestras (Tabla 4.2) consta de feldespatos (40,61 %), filosilicatos (30.62 %), cuarzo (21,88 %) y proporciones menores de anhidrita y calcopirita.

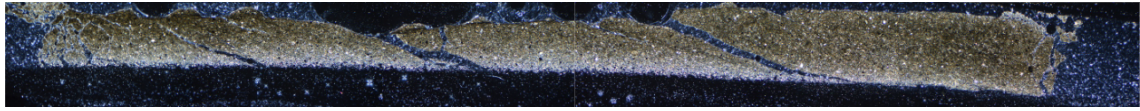
Tabla 4.2: Mineralogía CMET

Feldespato rico en Ca	$(Na, Ca)Al(Si, Al)_3O_8$	22.25 %
Anhidrita, syn	$CaSO_4$	5.37 %
Filosilicatos	$KFe_3 + 2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$	30.62 %
Feldespato rico en Na	$(Ca, Na)(Si, Al)_4O_8$	18.36 %
Chalcopirita	$CuFeS_2$	1.72 %
Cuarzo, syn	$SiO_2$	21.88 %

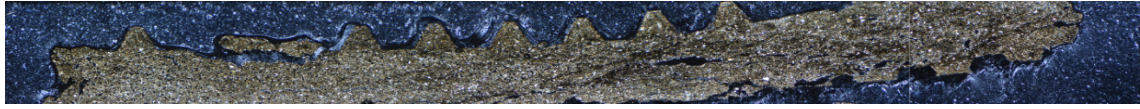
#### 4.1.1. Estructuras

Para un mejor análisis, se realiza una visualización a microscopio de las muestras para observar microestructuras.

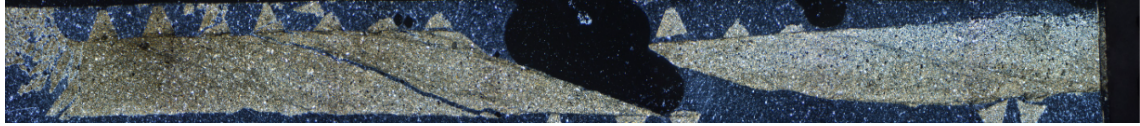
En primer lugar, al observar las muestras en microscopio no se aprecia un cambio ni mineralógico ni estructural a medida que se aumenta el stress normal, pero las estructuras en condición seca suelen estar abiertas, no así las estructuras de condición húmeda, lo que podría estar señalando una tendencia a comportamiento frágil en las primeras y una más dúctil cuando se les somete a agua. Además, estructuras del tipo Riedel y Petit se distinguen más en condiciones húmedas, como se puede observar en la figura 4.1.



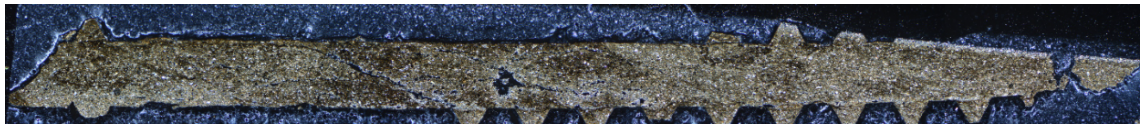
(a) 10 MPa a condición seca (muestra h282)



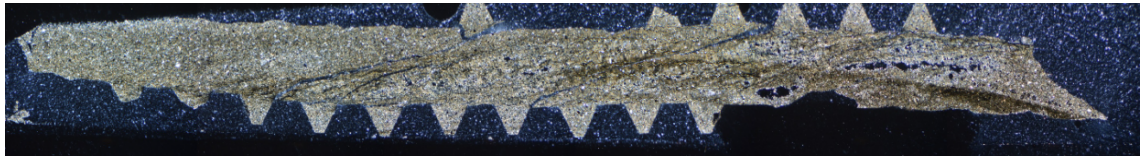
(b) 10 MPa a condición húmeda (muestra h285)



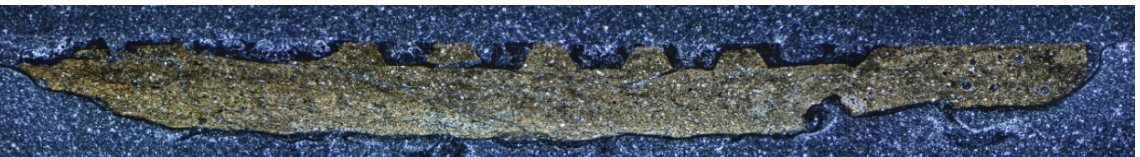
(c) 30 MPa a condición seca (muestra h281)



(d) 30 MPa a condición húmeda (muestra h287)



(e) 60 MPa a condición seca (muestra h283)



(f) 60 MPa a condición húmeda (muestra h288)

Figura 4.1: Muestras vistas en microscopio.

#### 4.1.2. Equipo HighSTEPS

El HighSTEPS es un aparato de presión y velocidad de temperatura de alta tensión que se utiliza para estudiar la mecánica de terremotos [Violay et al., 2021].

El equipo tiene una configuración tal que ejerce fuerza vertical y horizontal ( $\tau$  y  $\sigma_n$  respectivamente), como se observa en el siguiente esquema de Violay et al. [2021].

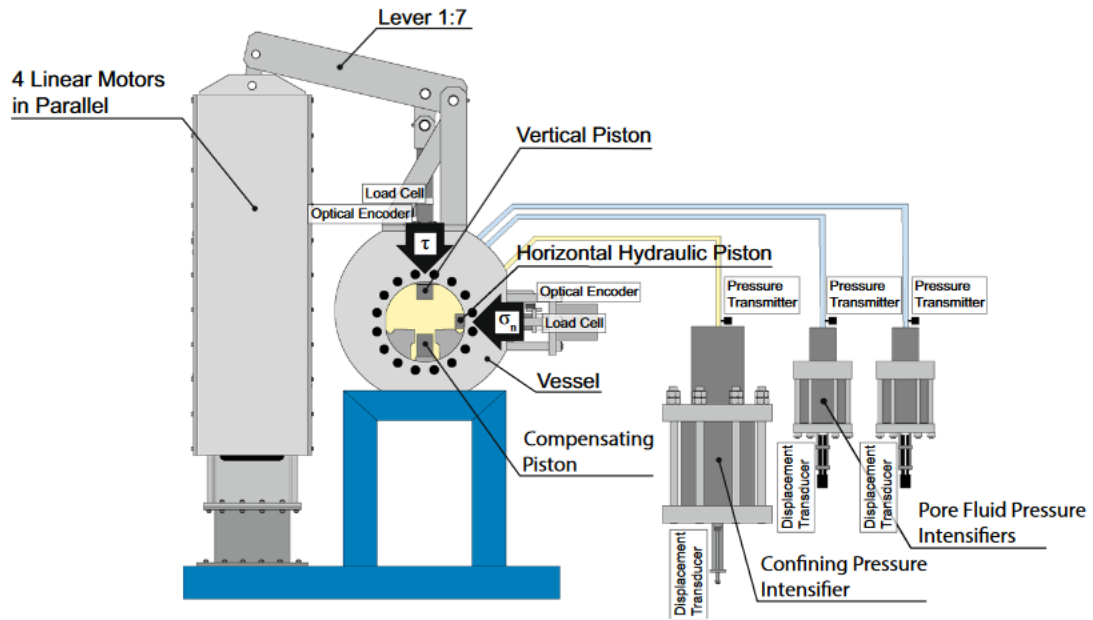


Figura 4.2: Esquema de equipo HighSTEPS. Violay (2021).

### 4.1.3. Procedimiento

Las muestras de la tabla 4.1 son sometidas al equipo HighSTEPS, las cuales fueron pulverizadas con mortero a un tamaño  $< 125\mu m$  (determinando con harneros manuales) simulando salbanda, son colocadas en portamuestras de 5x5 cm y dispuestas en el equipo con una configuración de doble corte directo (Figura 4.3).

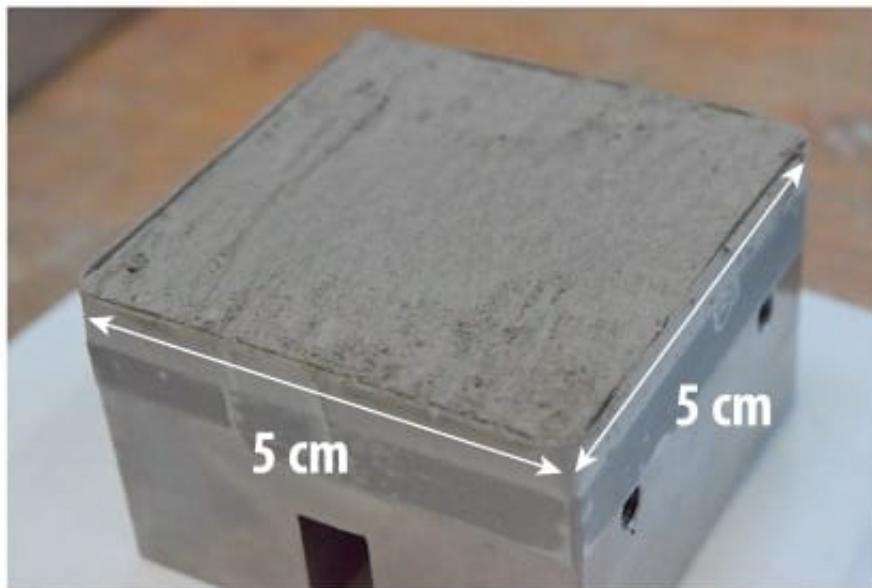


Figura 4.3: Muestra pre ensayos en equipo HighSTEPS. Foto editada de Orellana et al. [2018].

Se llevan a cabo experimentos en material de gubia simulada para caracterizar el comportamiento de fricción de la roca CMET en función de la tensión normal aplicada y la velocidad de deslizamiento. Se estudian las propiedades de fricción de CMET mediante la realización de pasos de velocidad y pruebas de deslizamiento-mantenimiento-deslizamiento en gubia de falla simulada a diferentes tensiones normales (hasta 60 MPa), que son las condiciones de interés para la minería subterránea.

Como ya se mencionó anteriormente, se ejercieron pruebas de laboratorio con una configuración biaxial, donde las muestras se vieron sometidas a estrés de corte y normales, como se observa en el diagrama de la figura 4.4.

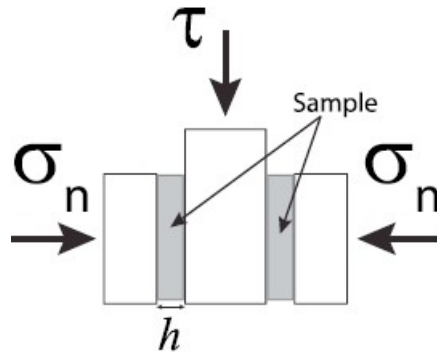


Figura 4.4: Configuración de doble corte directo utilizada en estos experimentos.

Es importante mencionar que se calcula el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) dividiendo la carga vertical por las superficies de la muestra ( $2 * 11.56 \text{ cm}^2$ ). Luego, se determina la fricción de Amonton  $\mu$  (o resistencia friccional) como la relación de la resistencia al corte,  $\tau$ , sobre la tensión normal aplicada,  $\sigma_n$ .

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma_n} \quad (4.1)$$

Al analizar los parámetros de fricción, se obtiene información sobre la estabilidad de la falla, estudiando la dependencia de la velocidad de la fricción imponiendo diferentes pasos de velocidad ( $1\text{--}300 \mu\text{m/s}$ ), lo que se traduce como aumentos repentinos de la velocidad de deslizamiento, provocando un aumento inmediato de la fricción seguido de una disminución exponencial, como se menciona en la sección 1.3.2 (Figura 4.5).



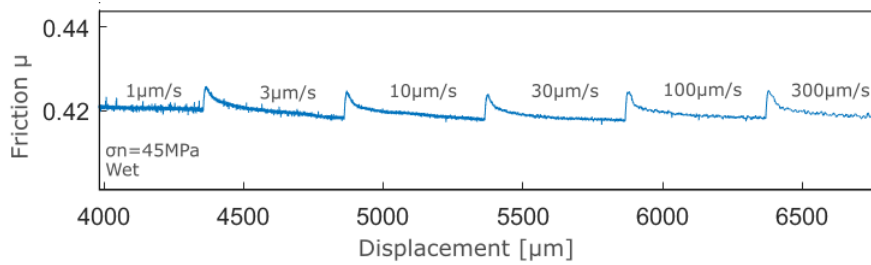


Figura 4.5: Coeficiente de fricción versus desplazamiento durante la secuencia de pasos de velocidad. Ejemplo de ensayo en muestra h298. Elaboración propia.

Luego de los pasos de velocidad, se llevaron a cabo ensayos de deslizamiento-mantenimiento-deslizamiento para evaluar la cantidad de curación por fricción ( $\Delta\mu$ ). Durante estos ensayos, las capas de gubia se sometieron a una velocidad constante de  $10 \mu\text{m}/\text{s}$ , seguido de un período de espera ( $t_h$ ) (Figura 4.6). En estos ensayos, la duración del período de retención varió entre 1 y 1000 s. Después del período de espera, se procedió a reanudar la velocidad de  $10 \mu\text{m}/\text{s}$ .

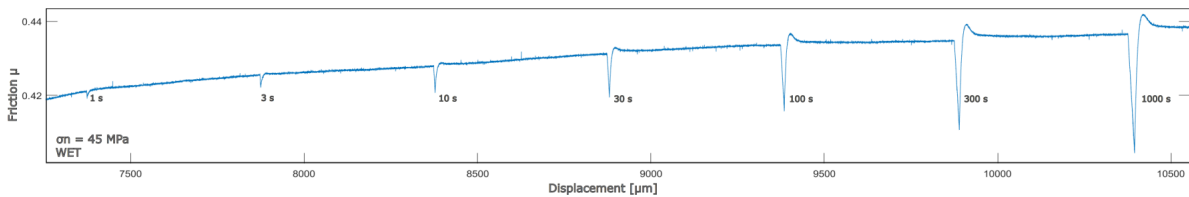


Figura 4.6: Coeficiente de fricción versus desplazamiento o tiempo durante la secuencia de deslizamiento-mantenimiento-deslizamiento. Ejemplo de ensayo en muestra h298. Elaboración propia.

Finalmente, con los datos friccionales obtenidos se proceden a graficar los resultados para concluir el comportamiento de la roca.

## 4.2. Muestras de falla

### 4.2.1. Muestras

Ya obtenidos los resultados de las muestras de gubia de falla simulada, se solicitan muestras de sondajes del yacimiento El Teniente, muestras que tienen ubicaciones definidas, lo cual sirve para realizar una asociación del comportamiento friccional con los sistemas de fallas principales. El mapa con la ubicación de las muestras y los sistemas de fallas a los que se han asociado se muestran a continuación:



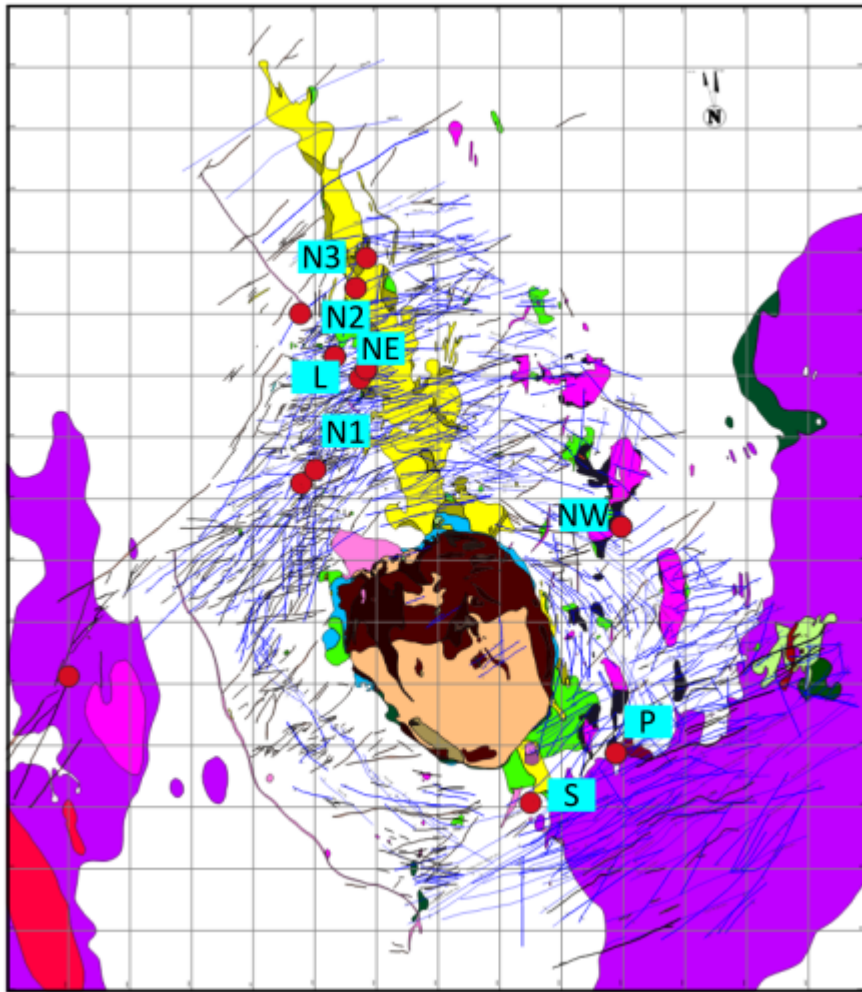


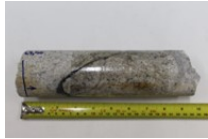








Figura 4.7: Planta geológica del nivel Mina 1983. Ubicación muestras de sondajes en puntos rojo y fallas asociadas en recuadros celestes.

Se han descrito 50 muestras de sondajes, de las cuales según la información entregada por Codelco, 20 están asociadas a 5 sistemas de fallas diferentes (sistema de falla L, sistema de falla P, sistema de falla S, falla mayor NW-SE y falla mayor SW-NE). Posterior a la descripción de las muestras, y considerando la ubicación de los sondajes, se pudo realizar una asociación estructural de 26 muestras restantes, quedando solo 4 sin asociación estructural. De estas 26 muestras, 6 se asociaron a la falla mayor NW-SE, 2 a la falla principal C, 2 a la falla secundaria N1, 4 a la falla secundaria N2, 11 a la falla secundaria N3 y 1 a la falla mayor Ten Sur 1. Esta información se resume en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Descripción muestras

Sistema de Falla	Litología	Nº Muestras	Elementos estructurales	Mineralogía	Fotografía
Falla C	Diorita - Gabro	2	Principalmente estructuras cerradas como stockwork de cuarzo, anhidrita y biotita.	Cuarzo, biotita, calcopirita y calcopirita localizada. Baja presencia de clorita caras expuestas.	
Falla SW-NE	Diorita - Gabro	1	Fracturas con molibdenita. Principalmente a 45° del eje del sondaje.	Sericita, anhidrita, biotita, calcita, cuarzo, calcopirita, bornita.	
Falla P	Diorita - Gabro	8	Stockwork, fracturas cerradas.	Sericita, anhidrita, biotita, calcita, cuarzo, calcopirita, bornita.	
Falla S	Dacita	2	Principalmente vetas de cuarzo y anhidrita como stockwork.	Cuarzo, sericitas, calcita y biotita.	
Falla L	Dacita	8	Fracturas abiertas, principalmente a 45° del eje del sondaje.	Cuarzo, biotita, sericita, clorita, pirita y calcopirita diseminada.	
Falla NW-SE	Diorita - Gabro	7	Fractura con molibdenita a 45° del eje del sondaje.	Sericita, biotita, calcita, cuarzo, calcopirita y bornita. Presencia de bornita y calcopirita en caras expuestas.	
Falla N1	Diorita - Gabro	2	Fracturas abiertas a 45° del eje del sondaje con relleno de anhidrita.	Cuarzo, óxidos, plagioclasa, anhidrita, biotita. Calcopirita y bornita diseminada. Anhidrita, calcita y algo de molibdenita en relleno de falla.	

Falla N2	Diorita - Gabro	4	Fracturas abiertas paralelas al eje del sondaje.	Cuarzo, plagioclasa/sericita, biotita/clorita, anhidrita, calcita. Calcopirita diseminada. Fracturas con alto contenido de calcita y biotita/clorita.	
Falla N3	Diorita - Gabro	10	Fracturas abiertas a 45° del eje del sondaje. Biotita/clorita como fibras minerales (indicador cinemático).	Cuarzo, biotita, anhidrita, sericita, piritita y calcopirita localizada. Clorita, bornita y calcopirita en las caras expuestas.	

En la tabla se logra notar que las litologías observadas corresponden a rocas ígneas (intrusivas y extrusivas) de composición ácida-intermedia, con alteración hidrotermal de cuarzo-sericita. En cuanto a las estructuras, se tienen tanto fracturas abiertas como fracturas cerradas (mayoritariamente con orientaciones de 45° con respecto a la dirección de eje del sondaje), junto a stockworks de vetillas de minerales de cuarzo y anhidrita principalmente. Es importante observar que la mineralogía es principalmente blanda, con durezas en la escala de Mohs menores a 5 (sin considerar el cuarzo), sobre todo en el relleno de las fallas, donde prevalece la anhidrita (dureza 3-3,5) y molibdenita (dureza 1-1,5).

De estas 50 muestras de testigos se escogieron las 17 muestras más representativas para realizar los experimentos de laboratorio (Tabla 4.4), los cuales se llevaron a cabo en las dependencias de la Escuela Politécnica Federal de Lausana (École polytechnique fédérale de Lausanne, EPFL) ubicada en Lausana, Suiza.


Tabla 4.4: Sistemas de fallas asociados a las muestras estudiadas.

Sistema de Falla	Tipo de Falla	Sector asociado	Nº Muestras
Falla P	Principal Maestra	Diamante	1
Falla L	Secundaria	Andesita	1
Falla S	Principal Mayor	Diamante	2
Falla NW	Principal Mayor	Andes Norte	3
Falla N1	Principal Maestra	Andesita	2
Falla N2	Principal Maestra	Andesita	4
Falla N3	Secundaria	Andesita	4

Las 17 muestras mencionadas provienen de 13 muestras que fueron cortadas para realizar

los experimentos, por lo que de algunas muestras se obtienen del mismo testigo, siendo al final las 17 muestras para ensayar descritas en la tabla que se presenta a continuación:

Tabla 4.5: Descripción muestras ensayadas

Sondaje	Nº Muestras	Litología	Elementos estructurales	Mineralogía relleno	Falla	Fotografía
SG1069-95.41_95.59	3	Pórfido diorítico	Falla	Molibdenita y anhidrita	NW-SE	
CB0001-68.53_68.70	1	Tonalita	Falla	Molibdenita y óxidos	P	
PA1253-67.18_67.45	1	Pórfido dacítico	Falla	Molibdenita	L	
PA1262-53.65_53.65	2	Brecha ígnea de Tonalita	Falla y vetillas	Anhidrita y clorita	S	
PA1278-6.77_6.94	1	Brecha de anhidrita	Falla	Anhidrita y calcita	N3	
PA1285-24.89_25.10	1	Brecha ígnea de pórfido dacítico	Falla	Anhidrita	N3	
PA1285-27.09_27.32	1	Brecha ígnea de pórfido dacítico	Falla	Anhidrita y calcita	N3	

Sondaje	Nº Muestras	Litología	Elementos estructurales	Mineralogía relleno	Falla	Fotografía
PA1320-12.19_12.83	2	Pórfido basáltico	Falla y vetillas	Anhidrita y molibdenita	N2	
SG0904-239.4_239.8	1	CMET	Falla y vetillas	Óxidos	N3	
PA1320-11.52_12.00	1	Pórfido basáltico	Falla	Anhidrita y calcita	N2	
PA1320-13.50_14.05	1	Pórfido basáltico	Falla y vetillas	Anhidrita y calcita	N2	
SG0897-148.13_148.16	1	CMET	Falla y vetillas	Anhidrita y calcita	N1	
SG0897-211.50_211.78	1	CMET	Falla y vetillas	Anhidrita y calcita	N1	

#### 4.2.2. Equipo DST 30/30 kN

Este es un equipo que hace experimentos de cizalle, donde se colocan las dos caras de la falla para hacerlas cizallar entre sí, ejerciendo fuerza en la vertical y en la horizontal. Al equipo se le entregan datos de esfuerzo normal, desplazamiento y velocidad de desplazamiento, para así medir el esfuerzo de corte en cada esfuerzo normal y cómo este varía con el desplazamiento a una cierta velocidad.



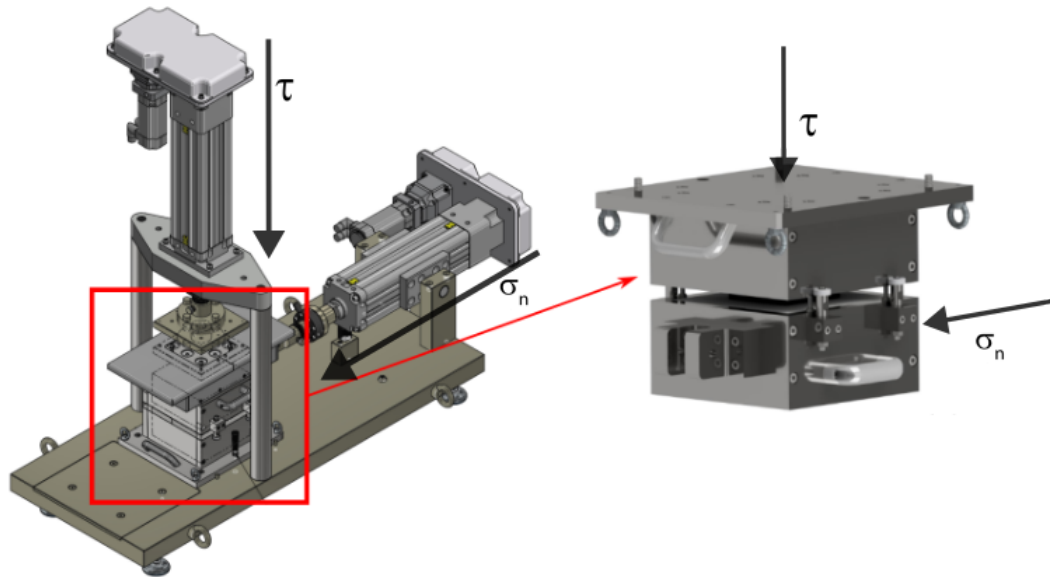


Figura 4.8: Esquemas de equipo DTS 30/30 kN. Walter + Bai AG (2022)

### 4.2.3. Procedimiento

Las muestras sometidas al equipo de cizalle DTS 30/30 kN, son puestas en placas con cemento, dejando expuesta solo la cara de la falla, de tal manera que el equipo pueda generar el cizallamiento al enfrenar las dos caras opuestas de la falla (Figura 4.9).

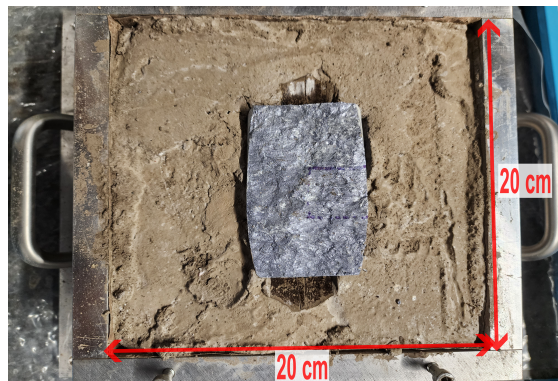
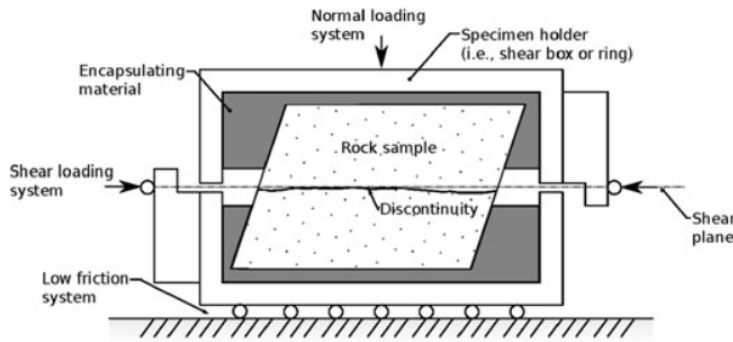
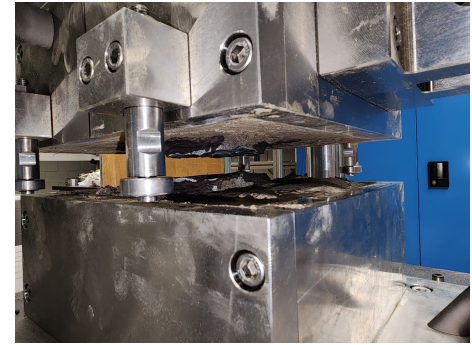


Figura 4.9: Muestra pre ensayos en equipo DTS 30/30 kN.

Se llevan a cabo experimentos en planos de falla de la roca CMET, simulando el movimiento de cizalle entre las dos caras opuestas del plano de falla. Para ellos, cada mitad de la muestra debe asegurarse en cada mitad del portamuestras, y como las muestras no encajan perfectamente en el portamuestras, se deben encapsular en algún otro material de fundición (en este caso se utilizó concreto) para garantizar un ajuste perfecto (Figura 4.10).



(a) Esquema extraído de Muralha et al. [2014]



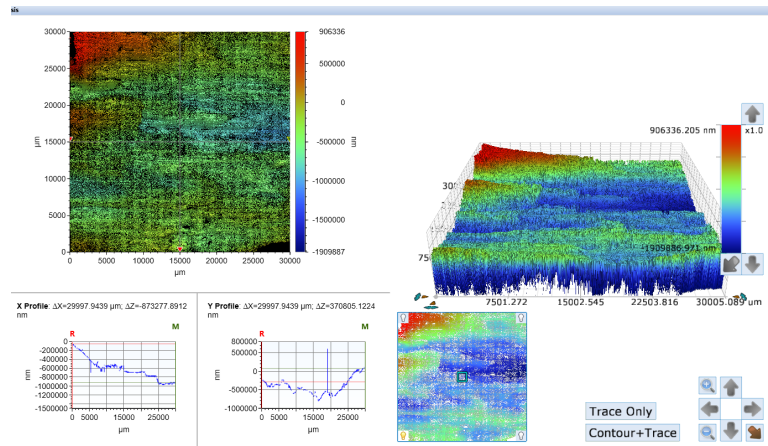
(b) Fotografía propia.

Figura 4.10: Muestra montada en portamuestras para experimento en equipo de cizalle

Antes de cualquier prueba se observa la rugosidad mediante un perfilómetro óptico (Fig. 4.11), el cual genera un perfil de la superficie de la muestra (en este caso se realizan perfiles en una zona de 3x3 cm, la cual debe ser representativa de toda la superficie).



(a) Perfilómetro.



(b) Resultados generados

Figura 4.11: Perfilómetro óptico.

Ya situadas las dos partes de la muestra en el equipo, se procede a definir los parámetros de fuerza normal, desplazamiento horizontal y velocidad. Cabe destacar que los valores de la fuerza normal se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$F_n = stress \cdot \text{área} \quad (4.2)$$

Donde los stress normal definidos para este tipo de ensayos son de 2, 4 y 6 MPa. Y el área es la de la superficie de la muestra a ensayar.

El desplazamiento definido para los 3 valores distintos de stress, son 5, 10 y 15 mm, es

decir, 5 mm por cada esfuerzo. Y la velocidad utilizada es de 0,18 mm/min ( $3\mu\text{m/s}$ ).

Ya definidos los parámetros, se realiza el experimento de cambio de esfuerzo normal, que consistió en avanzar sucesivamente en pasos de 5 mm con esfuerzos normales crecientes de 2 MPa, 4 MPa y 6 MPa [Muralha et al., 2014], para determinar cómo afecta el cambio de esfuerzos normales al esfuerzo de corte (Figura 4.12).

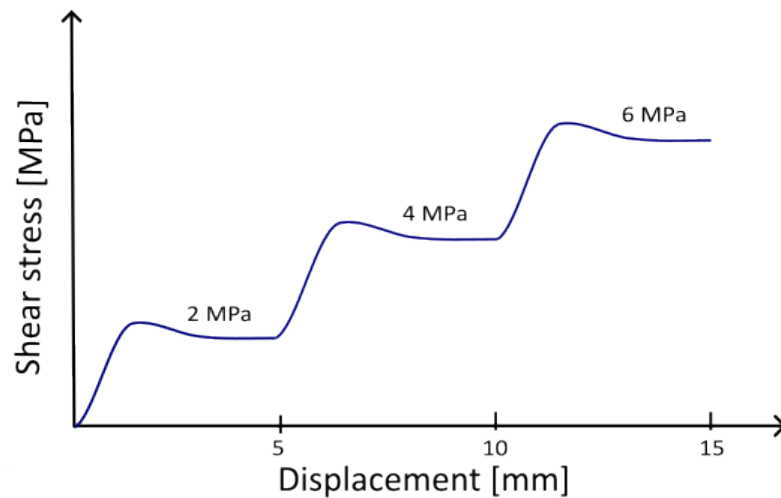


Figura 4.12: Gráfico esperado para un cambio de esfuerzos normales (2, 4 y 6 MPa).

Para visualizar mejor los resultados, se ajustan las 3 curvas de los distintos esfuerzos normales, en un desplazamiento (0,0), como se muestra en el siguiente ejemplo (Figura 4.13):

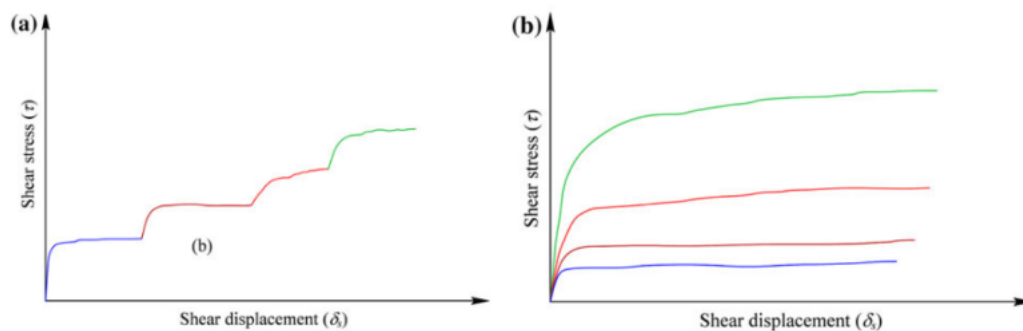


Figura 4.13: Ejemplo de ensayos de corte de múltiples etapas bajo diferentes cargas normales (a) sin reposicionamiento y (b) con reposicionamiento. ISRM, Muralha et al. [2014]

Luego de de obtenidas las curvas a distintos esfuerzos normales, se procede a volver a la muestra a su posición inicial y comenzar otro experimento, ahora de velocity step, es decir, utilizando un esfuerzo normal constante, variar la velocidad de desplazamiento, para así observar cómo esto afecta al esfuerzo de corte (Figura 4.14). Los parámetros definidos en este test son: stress normal = 6 MPa; desplazamientos de 2 mm en cada velocidad; velocidades:



3 - 10 - 30 - 100 y 300  $\mu\text{m/s}$ .

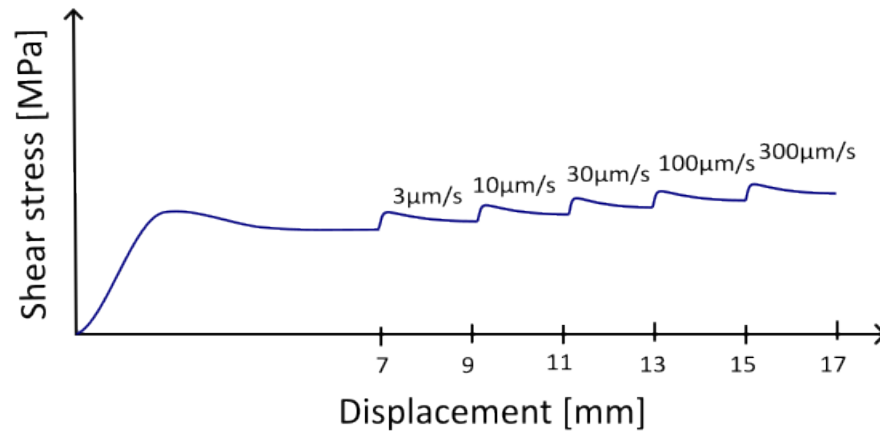


Figura 4.14: Gráfico esperado para un cambio de velocidades (3, 10, 30, 100 y 300  $\mu\text{m/s}$ ). Velocity step.

Finalmente, acabados ambos experimentos, se retira la muestra del equipo, se mide el cambio que tuvo en su rugosidad en comparación al momento antes del ensayo y se recupera la salbanda generada durante el ensayo para analizarla.

# Capítulo 5

## Resultados

### 5.1. Muestras gubia simulada

#### 5.1.1. Fricción

Tras realizar los experimentos de laboratorio, cada experimento, tanto los que están en condición seca como los que se encuentran en condiciones húmedas siguieron una historia típica de desplazamiento controlada por computadora (todos los valores obtenidos se visualizan en las tabla 7.1 y 7.2 de los anexos). El cizallamiento comenzó con una etapa inicial a una velocidad de desplazamiento constante de  $10 \mu\text{m/s}$ . Durante esta fase, la muestra se deformó cuasi-elásticamente hasta que se alcanzó un valor máximo de fricción seguido de una evolución a una fricción deslizando de estado estable.

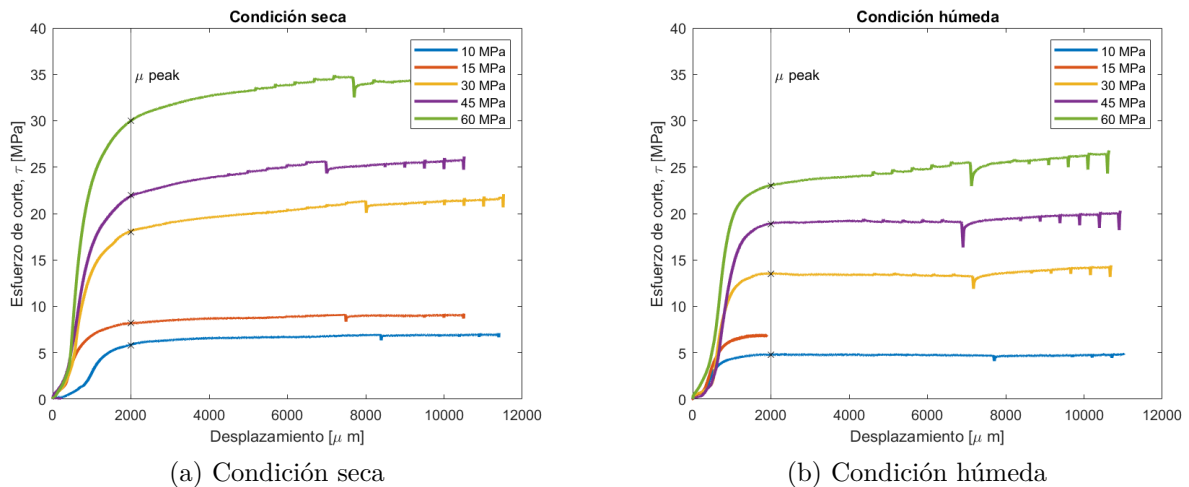


Figura 5.1: Experimentos de fricción realizados en las 10 muestras de gubia simulada de CMET a diferentes tensiones normales (de 10 MPa a 60 MPa), 5 en condición seca y 5 en condición húmeda. Muestras especificadas en tabla 4.1

Para todas las muestras, ya sea en secas o húmedas, en esfuerzo cortante ( $\tau$ ) evolucionó casi linealmente con el desplazamiento hasta que se alcanzó la resistencia máxima (Figura

5.1), y en dicho punto, la fricción máxima ( $\mu_{peak}$ ) alcanzó valores en el rango de [0.377 - 0.634]. Luego, a medida que continuaba el corte, el esfuerzo cortante alcanzó un valor residual correspondiente a un estado estacionario, implicando valores de fricción de estado estacionario ( $\mu_{ss}$ ), valores que variaron en el rango [0.398 - 0.677] (Figura 5.2).

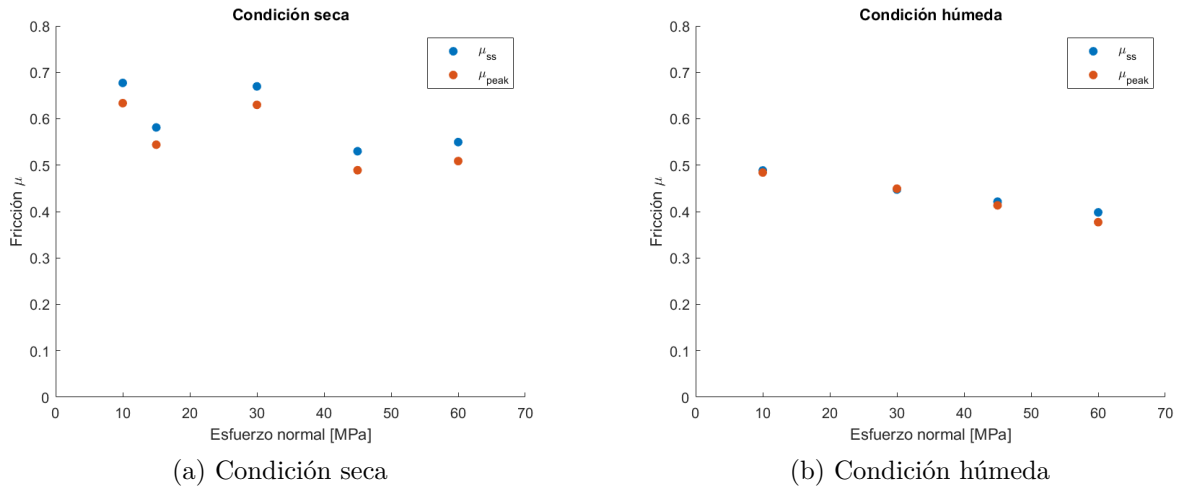


Figura 5.2: Coeficiente de fricción de Amonton  $\mu$  (ecuación 2.1) en función del esfuerzo normal.

Se observan menores coeficientes de fricción máximos y de estado estacionario en las muestras con mayor estrés normal, y aún menores valores en las que poseen condiciones húmedas.

Luego, recordando la ecuación 1.1, donde Lockner (2002) hace mención de una resistencia de corte “inherente”, y graficando el esfuerzo cortante,  $\tau$  en función del esfuerzo normal,  $\sigma_n$ , se llega a la ecuación de la recta  $\tau = \mu\sigma_n + \tau_o$ , por lo que se puede obtener una aproximación del valor de esta resistencia de corte inherente conociendo el coeficiente de fricción  $\mu$  (Figura 5.3).

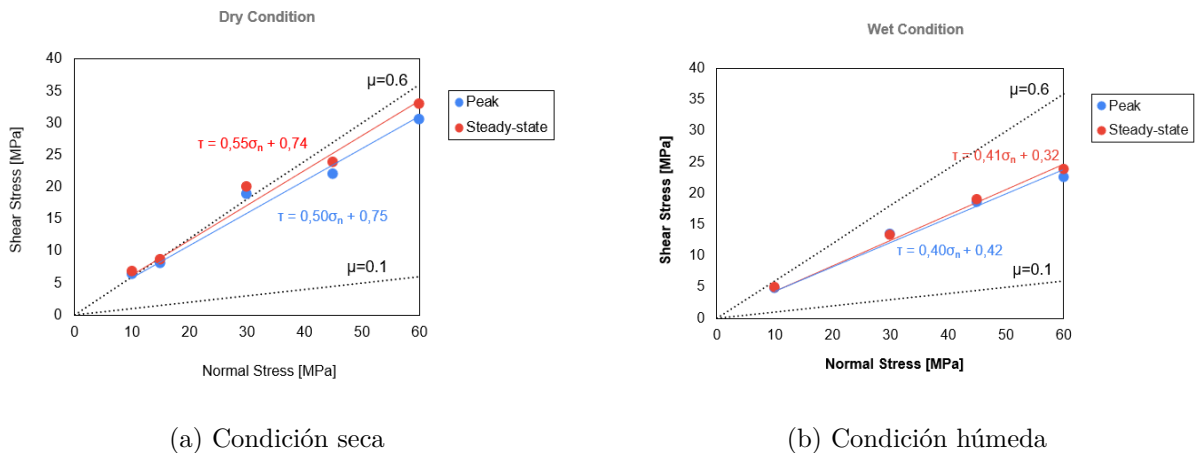


Figura 5.3: Esfuerzo cortante versus esfuerzo normal en muestras de gubia simulada de CMET, en condición seca y húmeda.

Linealizada la resistencia máxima y la estacionaria siguiendo el ajuste lineal propuesto, se obtiene que  $\tau_o$  para un estado máximo es de 0.74 MPa en condición seca y 0.32 MPa en condición húmeda. Y el  $\tau_o$  para los estados estacionarios poseen un valor de 0.75 MPa en condición seca y 0.42 MPa en condición húmeda, todos valores aproximados por una regresión lineal.

Cabe destacar que al mismo tiempo, se graficaron las rectas de  $\mu = 0.1$  (filosilicatos) y  $\mu = 0.6$  (granito), a modo de comparación.

### 5.1.2. Parámetro a-b

En la figura 3.6 se muestra un ejemplo de la medición de los parámetros friccionales a y b, donde se observa que el parámetro a (también conocido como efecto directo) es proporcional al cambio brusco friccional, y el parámetro b (también conocido como efecto de evolución) es proporcional a la caída posterior de la fricción a un nuevo estado estacionario. Y en esta investigación, los valores de (a-b) se encuentran en el rango  $[-0.00027, 0,00406]$  con una media en 0,00189 (Figura 5.4), los cuales son menores en una condición húmeda.

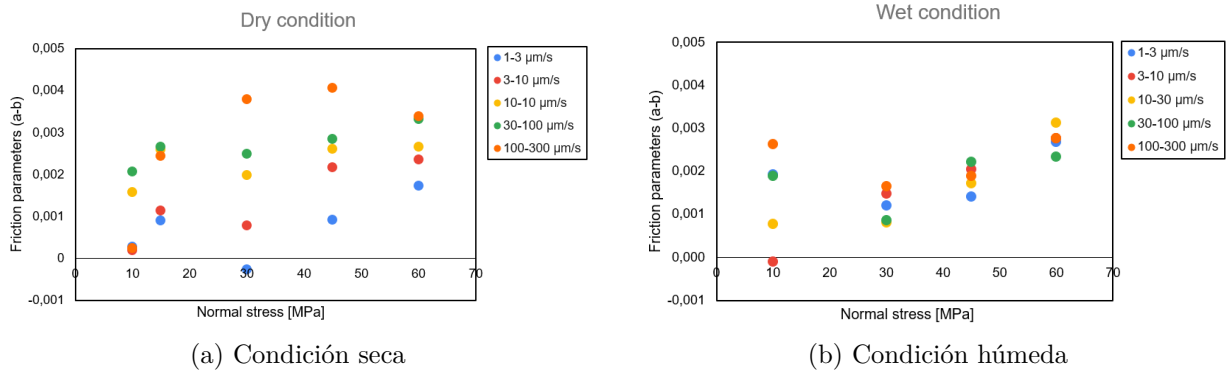


Figura 5.4: Parámetro de fricción de estabilidad (a-b) frente al estrés normal en muestras de gubia simulada de roca CMET.

En cuanto a la distancia crítica,  $D_c$ , la cual indica el tiempo que tarda la fricción en volver al estado estacionario desde el cambio de velocidad, se observa un aumento de ésta a medida que el ensayo posee un mayor esfuerzo normal (Figura 5.5), tanto en condiciones secas como en condiciones húmedas, pero en general, las distancias de recuperación son mayores en el caso húmedo.

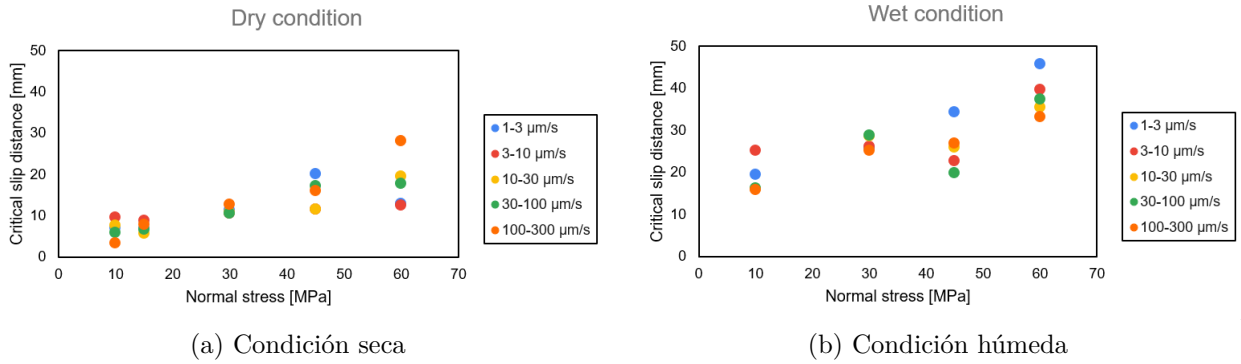


Figura 5.5: Distancia crítica de deslizamiento frente al estrés normal.

### 5.1.3. Healing

La figura 3.7 muestra la medición de la curación por fricción ( $\Delta\mu$ ). Cabe destacar que la curación por fricción se define como la diferencia entre la fricción estática máxima,  $\mu_s$ , y la fricción de estado estacionario pre y post hold,  $\mu_{ss}$ , y en este caso, se dió que a mayor  $\sigma_n$  la curación de fricción  $\Delta\mu$  es menor. Y dentro de un mismo experimento (con igual estrés normal),  $\Delta\mu$  aumenta a medida que aumenta el tiempo de espera, siendo siempre menor esta curación por fricción en una condición húmeda (Figura 5.6).

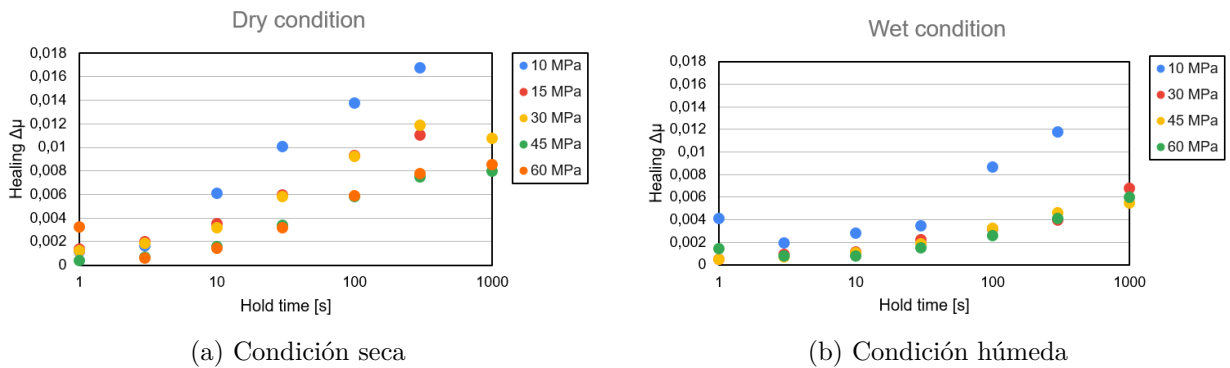


Figura 5.6: Parámetro de curación por fricción  $\Delta\mu$  versus el tiempo de espera.

## 5.2. Muestras fallas

A continuación se muestran los resultados de los 17 ensayos, correspondientes a muestras de las fallas NW, P, L, S, N1, N2 y N3 (todos los valores obtenidos se visualizan en la tabla 7.3 de los anexos).

### 5.2.1. Fricción

En primer lugar, se presentan los gráficos obtenidos al realizar los cambios de esfuerzo normal para las distintas fallas (Figuras 5.7 a 5.13). En general, para las muestras de fallas sometidas a un esfuerzo normal determinado, el esfuerzo de corte va aumentando progresivamente a medida que la muestra se somete a diferentes desplazamientos hasta llegar a un esfuerzo de corte estable. Además, si se comparan las curvas de distintos esfuerzos normales, se aprecia que a medida que el esfuerzo es mayor, los valores máximos de esfuerzo de corte son levemente mayores, con variaciones de hasta 2 MPa en el esfuerzo de corte.

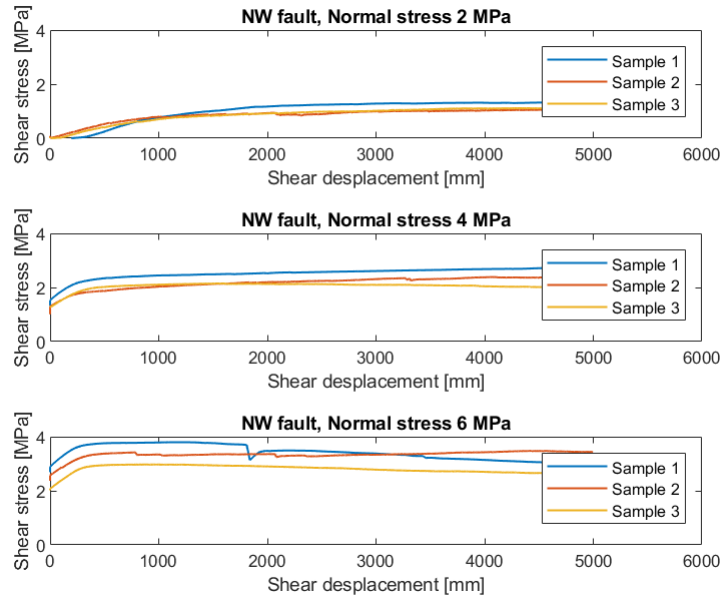


Figura 5.7: Gráfico de esfuerzo de corte para Falla NW (2, 4 y 6 MPa).

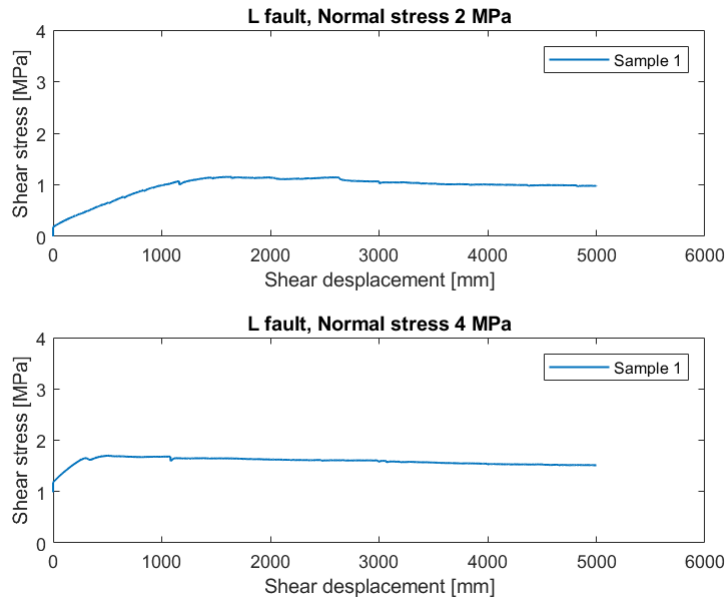


Figura 5.8: Gráfico de esfuerzo de corte para Falla L (2 y 4 MPa).

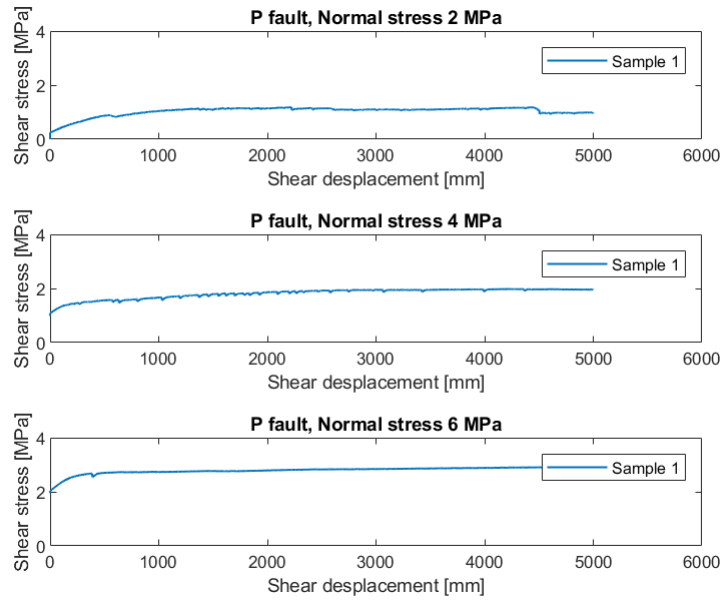


Figura 5.9: Gráfico de esfuerzo de corte para Falla P (2, 4 y 6 MPa).

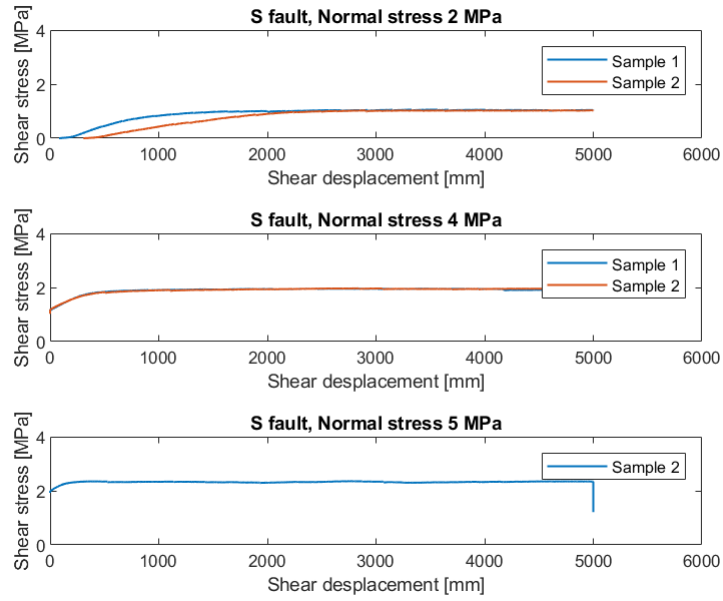


Figura 5.10: Gráfico de esfuerzo de corte para Falla S (2, 4 y 6 MPa).

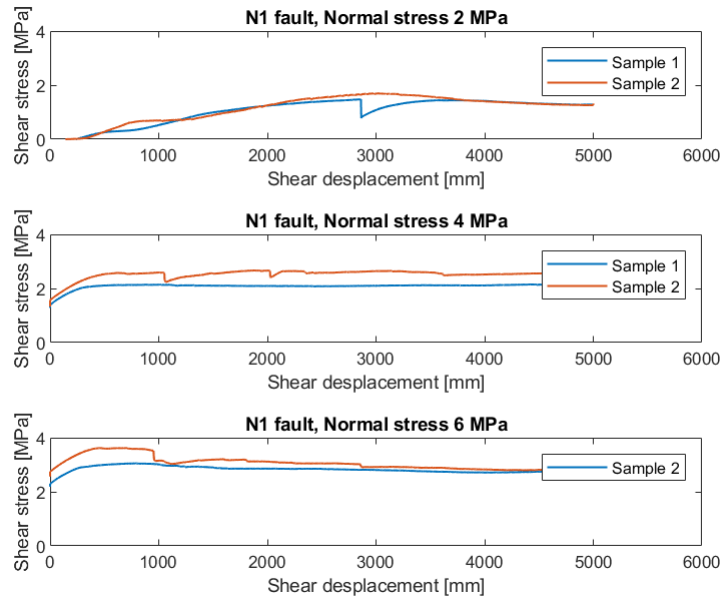


Figura 5.11: Gráfico de esfuerzo de corte para Falla N1 (2, 4 y 6 MPa).



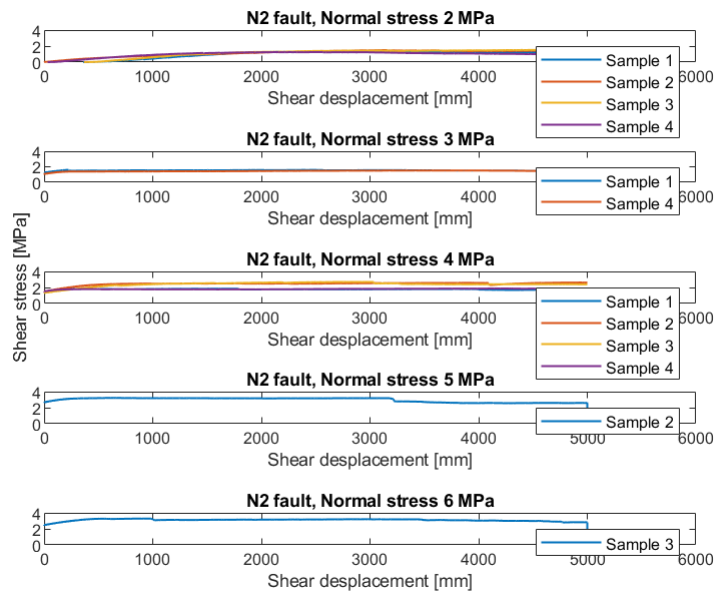


Figura 5.12: Gráfico de esfuerzo de corte para Falla N2 (2, 3, 4, 5 y 6 MPa).

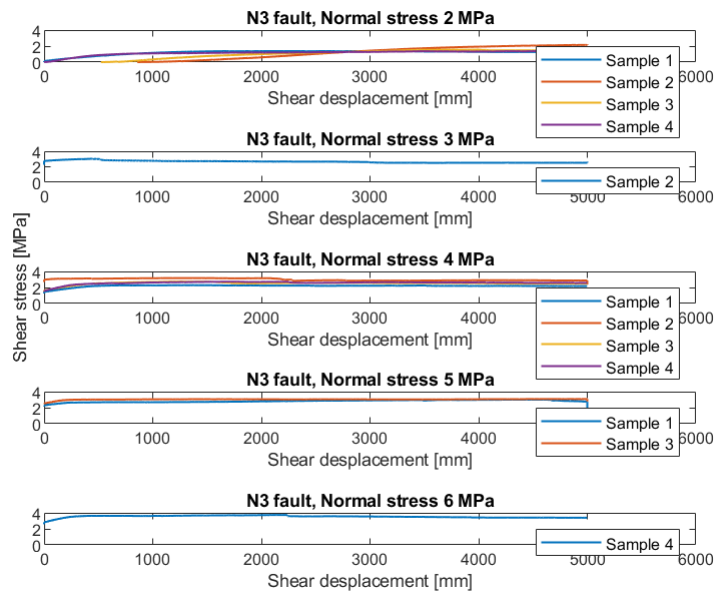
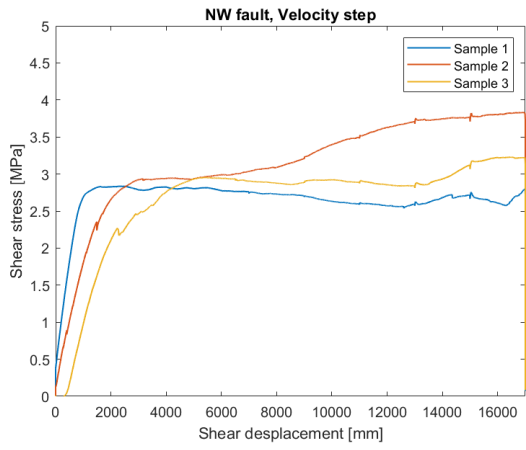
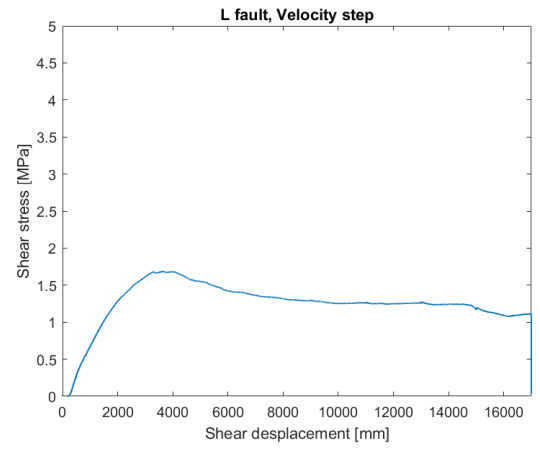


Figura 5.13: Gráfico de esfuerzo de corte para Falla N3 (2, 3, 4, 5 y 6 MPa).

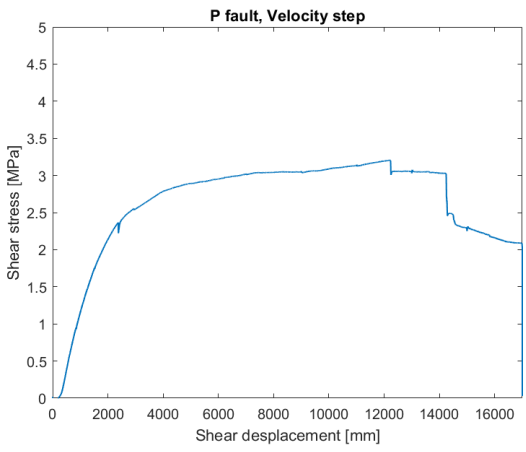
Luego, al graficar los cambios de velocidad para los sistemas de fallas respectivos se obtienen los siguientes gráficos (Figuras 5.14 y 5.15), los cuales en general muestran un crecimiento del esfuerzo de corte a medida que aumenta la velocidad de desplazamiento, lo que indicaría que aumenta la fricción (ya que el esfuerzo normal es constante) a medida que se incrementa la velocidad de desplazamiento.



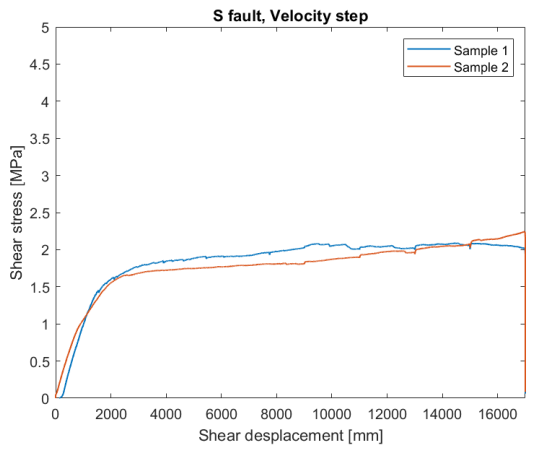
(a)



(b)

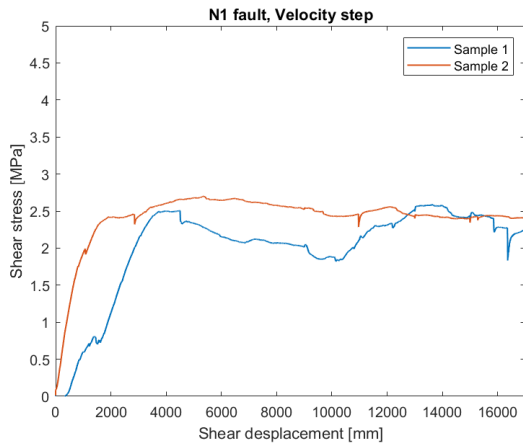


(c)

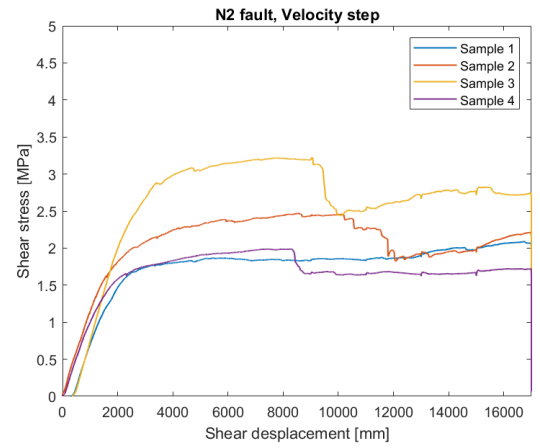


(d)

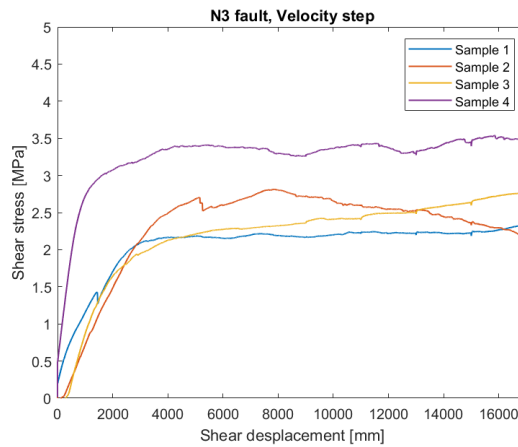
Figura 5.14: Gráficos de cambios de velocidad de desplazamiento para Fallas (a) NW, (b) L, (c) P y (d) S



(a)



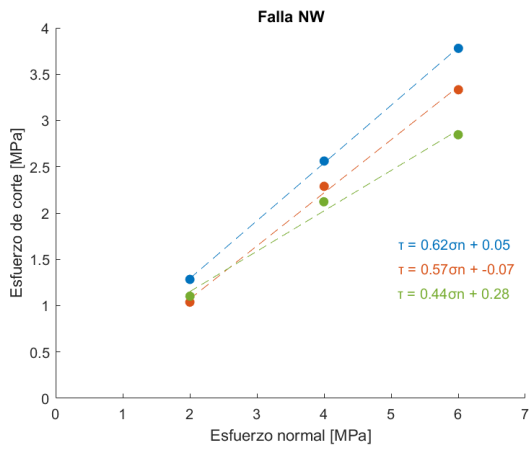
(b)



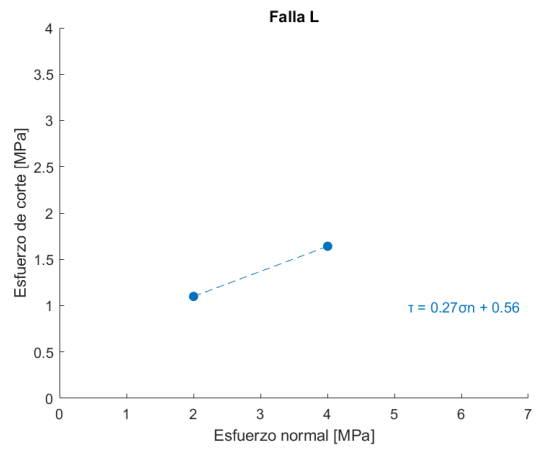
(c)

Figura 5.15: Gráficos de cambios de velocidad de desplazamiento para Fallas (a) N1, (b) N2 y (c) N3.

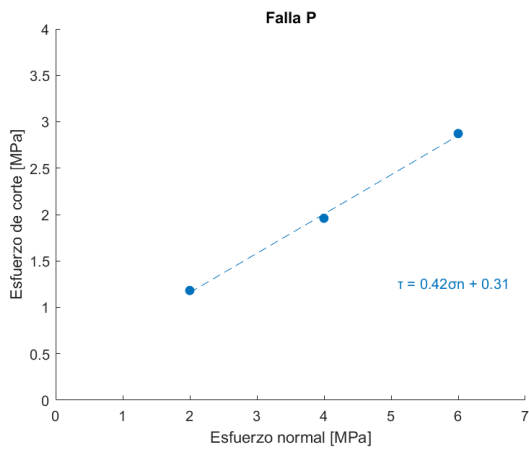
Posteriormente, calculados los valores de estrés normal y de corte cuando alcanzan la estabilidad de la curva (aproximadamente en un desplazamiento de 2.5 mm) en los ensayos de cambio de esfuerzo normal, y calculando la ecuación de la línea de tendencia para así obtener el coeficiente de fricción aproximado de la muestra, se generan las siguientes curvas de falla (Figuras 5.16 y 5.17):



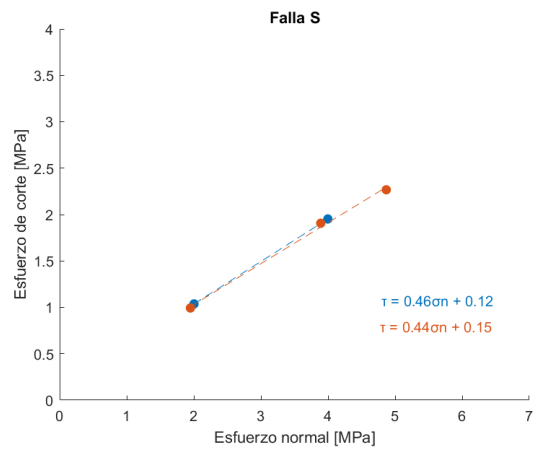
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.16: Gráficos esfuerzo normal vs esfuerzo de corte con línea de tendencia para obtener coeficiente de fricción de sistema de Falla (a) NW, (b) L, (c) P y (d) S

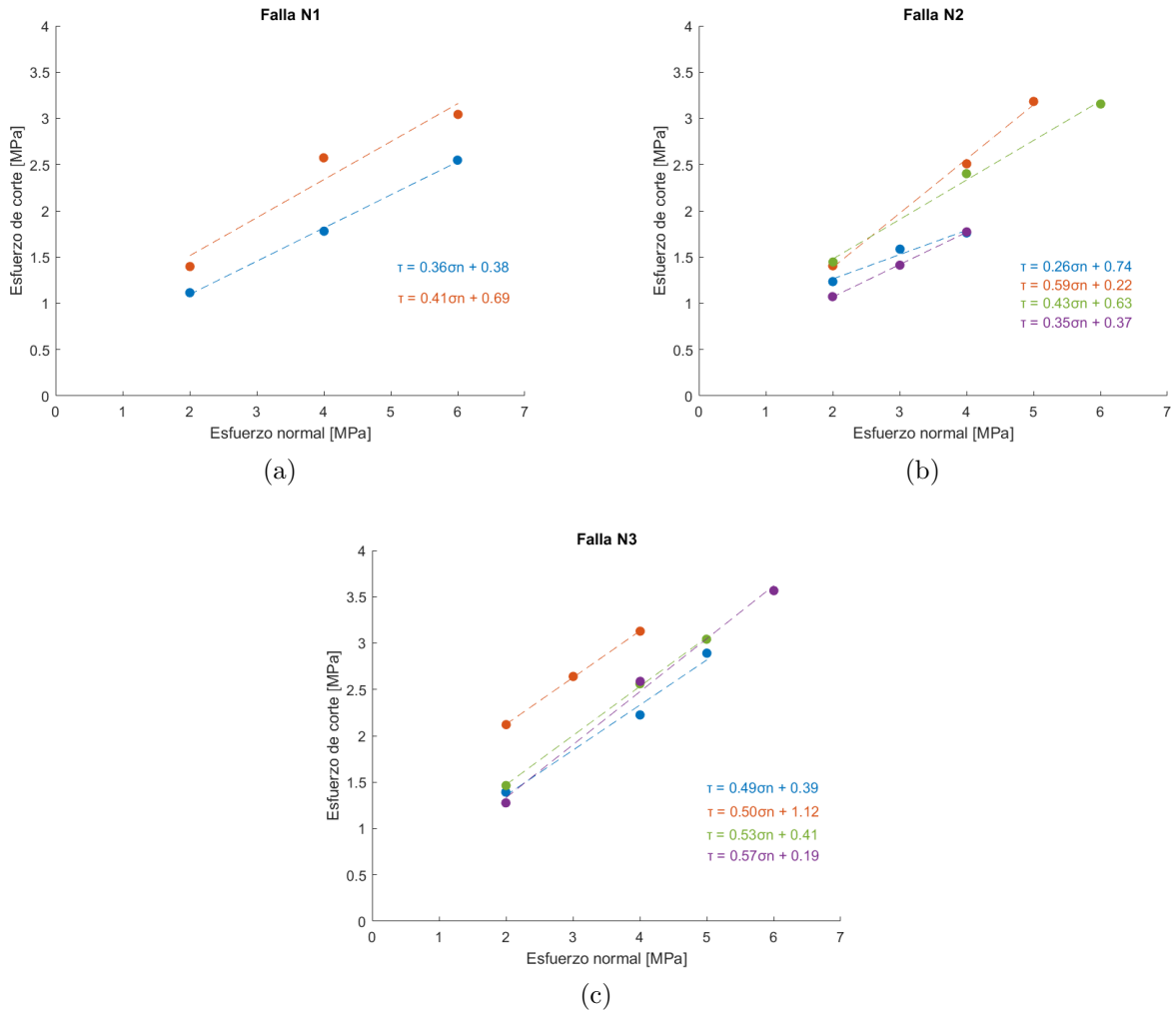


Figura 5.17: Gráficos esfuerzo normal vs esfuerzo de corte con línea de tendencia para obtener coeficiente de fricción de sistema de Falla (a) N1, (b) N2 y (c) N3.

De los gráficos, se obtienen los valores de fricción ( $\mu$ ) y de la resistencia al corte inherente del material ( $\tau_o$ ) de las fallas NW, P, S, L, N1, N2 y N3, datos resumidos en la tabla 5.1. Cabe mencionar que se calculó una fricción considerando cohesión igual a cero, es decir,  $\mu = \tau/\sigma_n$  y otra fricción en términos generales de la muestra con la línea de tendencia mostrada en las imágenes anteriores, donde en el caso que se tenía una intersección con el eje y (cohesión, resistencia de corte inherente) negativa se llevó a cero (muestra 2 de Falla Mayor NW), ya que no es consistente tener una cohesión negativa.

Tabla 5.1: Valores de fricción y resistencia de corte inherente ( $\tau_o$ ) obtenidos por falla.

Falla	Muestra	Esf. Normal ( $\sigma_n$ )	$\mu$ con cohesión 0	$\mu$ con cohesión $\neq 0$	$\tau_o$ [MPa]
Falla Mayor NW	Muestra 1	2 MPa	0.642	0.62	0.05
		4 MPa	0.640		
		6 MPa	0.629		
	Muestra 2	2 MPa	0.519	0.57	0
		4 MPa	0.572		
		6 MPa	0.555		
	Muestra 3	2 MPa	0.551	0.44	0.28
		4 MPa	0.531		
		6 MPa	0.474		
Falla maestra P	Muestra 1	2 MPa	0.591	0.42	0.31
		4 MPa	0.490		
		6 MPa	0.479		
Falla secundaria L	Muestra 1	2 MPa	0.550	0.27	0.56
		4 MPa	0.410		
Falla mayor S	Muestra 1	2 MPa	0.518	0.46	0.12
		4 MPa	0.489		
	Muestra 2	2 MPa	0.509	0.44	0.15
		4 MPa	0.490		
		5 MPa	0.466		
Falla secundaria N1	Muestra 1	2 MPa	0.557	0.36	0.38
		4 MPa	0.445		
		6 MPa	0.425		
	Muestra 2	2 MPa	0.698	0.41	0.69
		4 MPa	0.644		
		6 MPa	0.507		

Falla secundaria N2	Muestra 1	2 MPa	0.617	0.26	0.74
		3 MPa	0.528		
		4 MPa	0.440		
	Muestra 2	2 MPa	0.703	0.59	0.22
		4 MPa	0.627		
		5 MPa	0.636		
	Muestra 3	2 MPa	0.722	0.43	0.63
		4 MPa	0.601		
		6 MPa	0.526		
	Muestra 4	2 MPa	0.537	0.35	0.37
		3 MPa	0.471		
		4 MPa	0.443		
Falla secundaria N3	Muestra 1	2 MPa	0.698	0.49	0.39
		4 MPa	0.556		
		5 MPa	0.578		
	Muestra 2	2 MPa	1.060	0.50	1.12
		3 MPa	0.879		
		4 MPa	0.781		
	Muestra 3	2 MPa	0.732	0.53	0.41
		4 MPa	0.640		
		5 MPa	0.609		
	Muestra 4	2 MPa	0.639	0.57	0.19
		4 MPa	0.646		
		6 MPa	0.594		

### 5.2.2. Prámetro a-b

De los ensayos de pasos de velocidad mostrados, se obtienen los parámetros friccionales a y b, específicamente el valor de (a-b) (Sección 3.2.1). Los valores obtenidos se presentan en el siguiente gráfico según falla y ordenadas de acuerdo a su contenido de molibdenita (Figura 5.18).

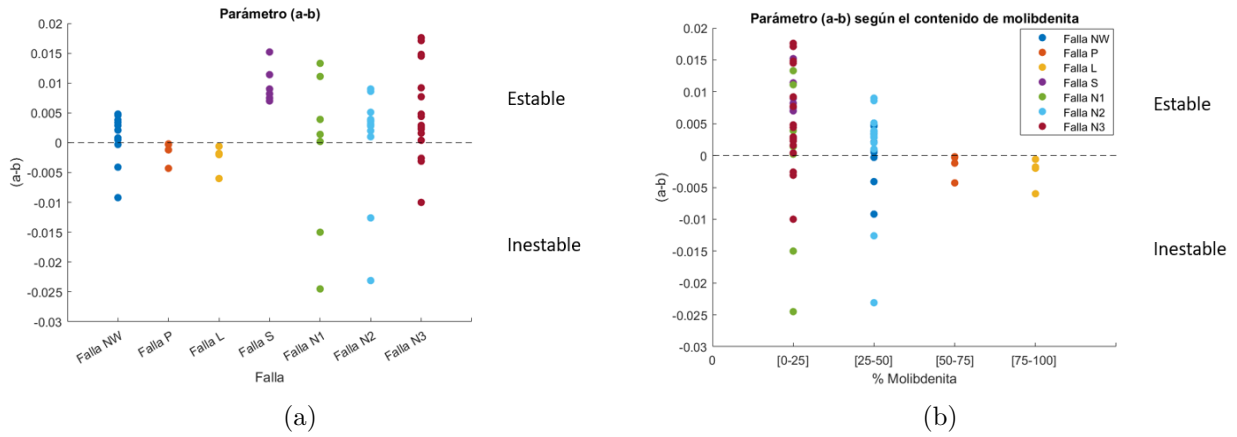


Figura 5.18: Gráfico de parámetro (a-b). (a) Para las 7 fallas estudiadas y (b) según contenido de Molibdenita.

Según se observa en la Figura 5.18, los valores de (a-b) varían desde -0.025 a 0.020. Se puede observar que las fallas que contienen mayor porcentaje de Molibdenita ( $MoS_2$ ) son las que poseen valores de (a-b) menores, es decir, donde b es más grande que a, indicando un comportamiento más inestable (debilitamiento por velocidad) que en fallas con contenido menor de  $MoS_2$  donde la mayoría de los valores de (a-b) son positivos y hay un fortalecimiento por velocidad.

### 5.2.3. Rugosidad

Finalmente, como se mencionó en la sección de metodología, se realizaron pruebas con el perfilómetro óptico para observar la rugosidad antes y después de los experimentos de cizalle. El software utilizado es Vision64 de Bruker, el cual muestra la representación tridimensional de la topografía de la superficie (Figura 5.19). Se midieron varios valores de parámetros de textura de la superficie superficial para caracterizar la topografía de la superficie, que incluye  $S_a$  (rugosidad de la superficie),  $S_p$  (la altura máxima de la cima de la superficie),  $S_v$  (profundidad máxima del valle o pozo),  $S_z$  (la suma del valor de altura de la cima más grande y la profundidad mayor del pozo o valle),  $S_q$  (valor cuadrático medio del área de muestreo),  $S_{sk}$  (la medida de asimetría o simetría en la rugosidad),  $S_{ku}$  (curtosis de la distribución de altura de la topografía)/(la extensión de la distribución de altura) [Ramakrishnaiah et al., 2017]. En este estudio se consideró la media  $S_a$  porque este parámetro proporciona la media aritmética de las alturas de la superficie de muestreo, y este valor fue graficado para las diferentes muestras pre y post experimentos (Figura 5.20), para determinar el efecto del movimiento de cizalle en la rugosidad de la superficie.



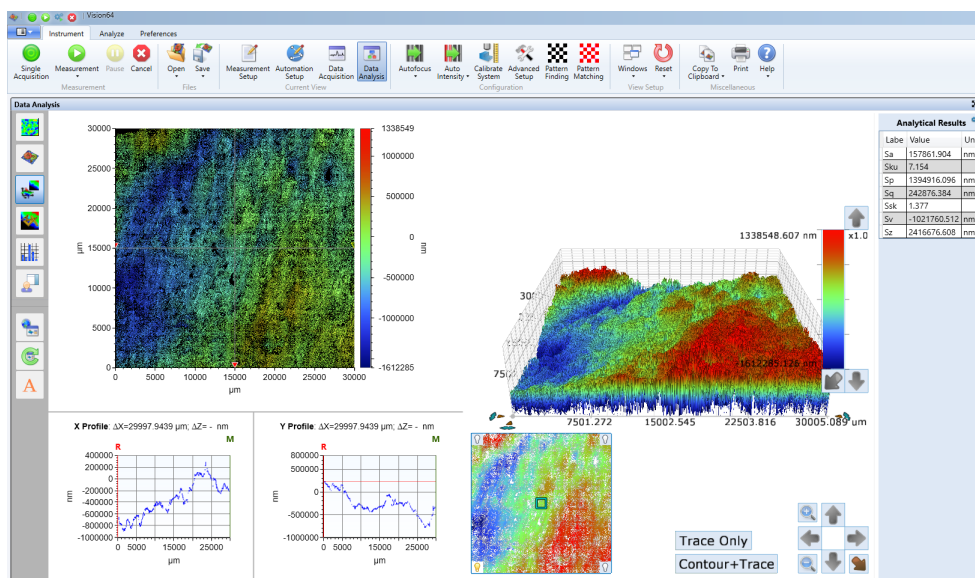


Figura 5.19: Ejemplo de perfil topográfico obtenido del software Vision64

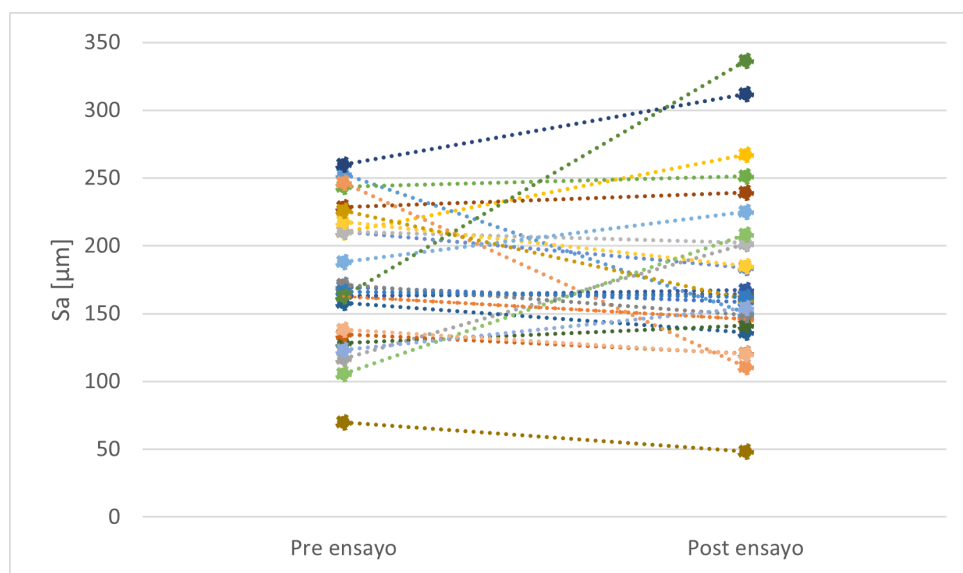


Figura 5.20: Gráfico de parámetro Sa de rugosidad pre y post ensayos.

El rango de valores de rugosidad promedio antes y después de los ensayos se amplía ligeramente, pasando de  $\sim 70$ -250 micrones antes de los ensayos a  $\sim 50$ -350 micrones después de los ensayos. De la figura 5.20 se desprende que no se logran sacar conclusiones sobre el cambio de rugosidad antes y después del ensayo, porque algunas aumentan su valor y otras lo disminuyen.

# Capítulo 6

## Discusiones

### 6.1. Gubia simulada

#### 6.1.1. Mineralogía

Las muestras de gubia simulada de CMET tienen aproximadamente un 30 % de minerales blandos (annita 28.9 %, calcopirita 1.72 % y nimita 1.53 %), lo que según estudios anteriores, sería suficiente para que el material se comporte como un material blando y débil. Aunque, se ha señalado que este mayor comportamiento débil lo entrega la presencia de clorita, y considerando que la nimita es un tipo de clorita, y se encuentra en un escaso 1.53 % probablemente no sea suficiente para cambiar el carácter del material.

#### 6.1.2. Microestructuras

Al observar las microestructuras en microscopio, se logra identificar que en condición seca, las estructuras suelen estar abiertas, no así las estructuras de condición húmeda, lo que estaría señalando una tendencia a comportamiento frágil en las primeras y más dúctil cuando se les somete a agua, comportamiento esperado según antecedentes previos.

#### 6.1.3. Esfuerzo y fricción

Al someter las muestras de gubia simulada a esfuerzos normales de 10, 15, 30, 45 y 60 MPa se observa que a medida que aumenta el esfuerzo normal, se alcanza un mayor esfuerzo de corte, y que éste es aún mayor en condición seca. Junto a esto, con el aumento de los esfuerzos también se observa una leve disminución de la fricción, la cual es aún menor en condiciones húmedas, es decir, si la muestra está sometida a agua, la resistencia al desplazamiento será menor, favoreciendo el deslizamiento y siendo más inestable.

Finalmente, al graficar la línea de tendencia que siguen las muestras estudiadas se obtiene que la fricción en estado estacionario para las muestras secas es de 0.5, y en el caso de las muestras húmedas es de 0.4, ambos levemente menores a los valores esperados en una roca ( $\sim 0.6$ ), pero mayores a lo de filosilicatos ( $\sim 0.1$ ). Cabe destacar que a modo de comparación,

las muestras en condición seca presentan un comportamiento friccional bastante similar al del granito, lo que es una buena comparación ya que las mineralogías del granito con la de las muestras de CMET estudiadas son similares, con menor contenido de cuarzo (20 %).

#### **6.1.4. Parámetro a-b**

Observando la diferencia entre los parámetros friccionales a y b, se observa que las muestras de gubia simulada de CMET poseen valores de (a-b) positivos, es decir, exhiben un comportamiento de fortalecimiento por velocidad, sísmico. Además, se identifica que el parámetro (a-b) fue aumentando a medida que las velocidades eran mayores, es decir, cada vez que los pasos de velocidad eran más considerables en cuanto a magnitud, la diferencia entre los parámetros era mayor y se puede interpretar como mayor estabilidad. Lo mismo sucede si se somete la muestra a condición húmeda, pero con la diferencia que todos los valores se reducen (otro argumento para señalar que las muestras húmedas tienden a ser más inestables que las secas), mostrando un comportamiento con mayor fortalecimiento por velocidad cuando la muestra está seca.

Junto con lo anterior, en el ensayo de velocity step en gubia simulada, la distancia crítica que se desplaza el material antes de volver a su fricción de estado estacionario post cambio de velocidad, es mayor en una condición húmeda, lo que indica que en condiciones húmedas, pese a tener una alta fricción, el material es capaz de desplazarse más distancia que estando seco.

#### **6.1.5. Healing**

Al analizar la recuperación de la fricción al tener tiempos de descanso entre deslizamientos, y obteniendo un mayor  $\Delta\mu$  a medida que aumenta el tiempo de pausa (hold time), se sugiere que mientras mayor sea el tiempo que se detiene el experimento, más le cuesta recuperar la fricción al material, curándose más lento. Además, en condiciones secas, esta curación es aún menor que en condiciones húmedas, siendo más sencillo recuperar la fricción cuando la muestra está sometida a agua, lo que indicaría un material débil que continúa con la misma fricción rápidamente.

## **6.2. Fallas**

### **6.2.1. Esfuerzo y Fricción**

Como se mencionó anteriormente, se han realizado experimentos sistemáticamente de doble cizallamiento directo en fallas que cortan el Complejo Máfico El Teniente (CMET), a un esfuerzo normal que oscila entre 2 y 6 MPa y una velocidad de deslizamiento entre 1 y 300  $\mu\text{m/s}$ . Dentro de los experimentos hay de dos tipos, uno cambiando el esfuerzo normal y otro realizando pasos de velocidad. Los primeros resultados señalan que los valores de esfuerzo de corte aumentan progresivamente durante todo el experimento, junto al aumento de tensión

normal.

Para los esfuerzos normales de 2 y 4 MPa, se grafican los comportamientos en las 7 fallas estudiadas (NW, P, L, S, N3, N2 y N1), donde se observa que en general hay un comportamiento similar, con esfuerzos de corte que llegan a los 1.5 MPa en el caso de un esfuerzo normal de 2 MPa y esfuerzo de corte hasta 3 MPa en el caso de un esfuerzo normal de 4 MPa (Figura 6.1), es decir, con un mayor esfuerzo normal se alcanzan mayores esfuerzos de corte.

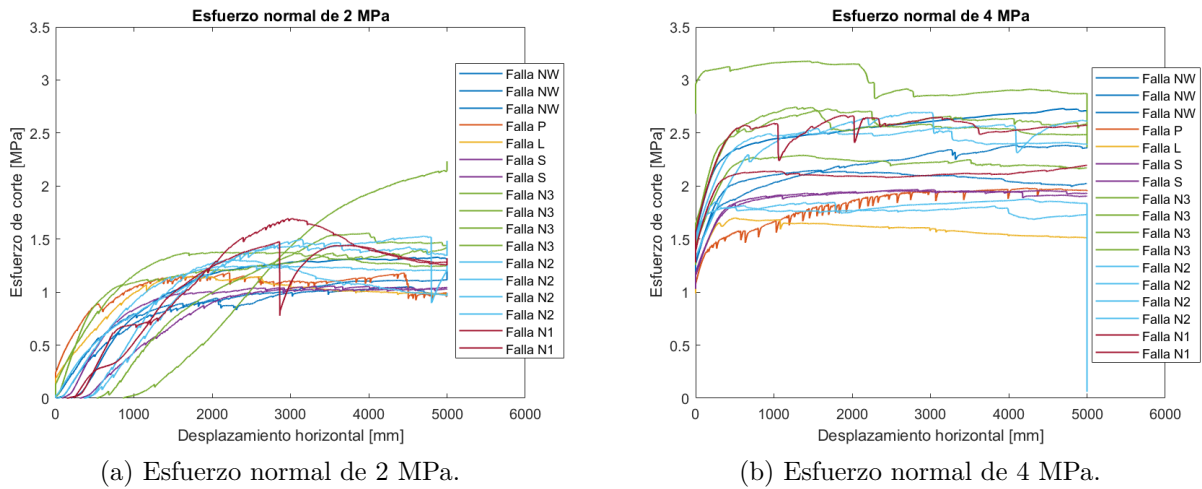


Figura 6.1: Gráfico Desplazamiento horizontal vs Esfuerzo de corte para las 7 fallas (NW, L, P, S, N1, N2 y N3)

Además, es importante mencionar que en las fallas con mayor contenido de molibdenita (Falla L) se logra observar una menor fricción que en las fallas con menor contenido de este mineral (Figuras 6.2 y 6.3), sugiriendo que minerales como la molibdenita debilitan la roca haciéndola más inestable y propensa a un deslizamiento.

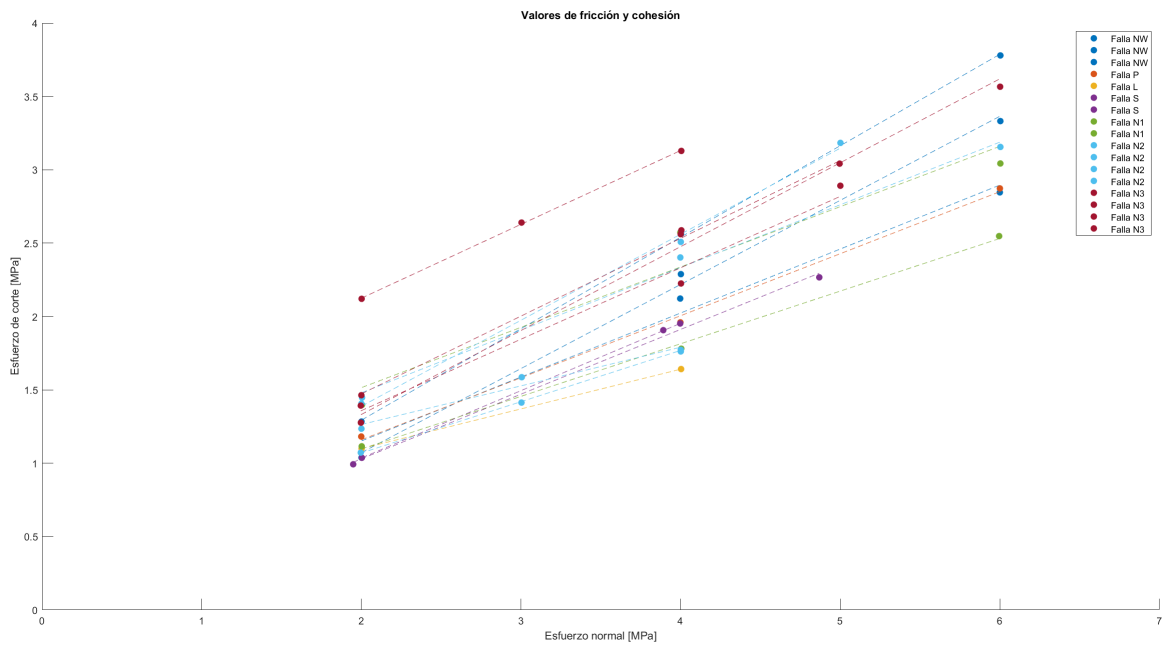


Figura 6.2: Gráfico con los valores de fricción y resistencia al corte inherente para los distintos tipos de fallas. Esfuerzo normal vs Esfuerzo de corte.

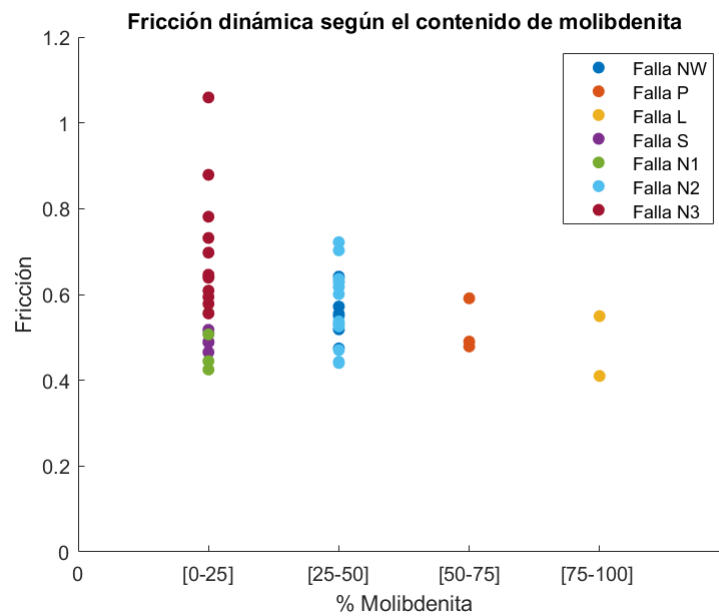


Figura 6.3: Gráfico con los valores de fricción dinámica con respecto al contenido de Molibdenita en cada muestra.

Posteriormente, si se analizan los valores de los coeficientes de fricción máximos y en estado estacionario para los distintos experimentos, se observa que los valores de los peaks son menores, es decir, no son los valores máximos que se alcanzan en el experimento, y la fricción sigue aumentando a medida que pasa el tiempo, lo cual es interesante de analizar,

considerando que en la mayoría de los casos, se alcanza un peak de fricción, luego un descenso y después los valores estacionarios, los cuales son menores al peak inicial. No así en este caso, ni en condiciones secas ni en condiciones húmedas, donde la fricción en estado estacionario es la mayor.

### **6.2.2. Parámetro a-b**

En las muestras de fallas, se observó que en las fallas con mayor contenido de molibdenita se tienen valores del parámetro friccional (a-b) negativos y en las con un bajo contenido de molibdenita se tienen valores de tendencia positiva, lo que indica que si la falla posee alto contenido de molibdenita se tiene un comportamiento con tendencia asísmica, siendo debilitado por el aumento de velocidad (Figura 5.18).

### **6.2.3. Rugosidad**

Luego de medir la rugosidad de la muestra pre y post ensayos se obtienen resultados que no son concluyentes, lo que se atribuye a la escala de medición, ya que la rugosidad presenta un rol importante en las fallas a escala de metros, y en este caso por limitancias de los equipos y de tiempo se realizó esta medición en áreas de 3x3 cm, lo cual no es representativo de la escala falla.

## **6.3. Implicancias**

Obtenidos los valores de fricción, de a-b y de la recuperación (healing) se puede tener un mayor conocimiento sobre el comportamiento sísmico de las fallas estudiadas, lo cual ayuda a tomar decisiones sobre procesos que involucren esfuerzos en minería, y así evitar o mitigar las consecuencias de futuros colapsos. En concreto, con este estudio se comprueba que hay una relación directa entre el esfuerzo de corte y el esfuerzo normal que se aplica a una roca. Además, se conoce que minerales como la molibdenita juegan un rol importante en las condiciones de estabilidad de una falla, donde si se tiene una falla con alto contenido de molibdenita en su relleno, esta falla será más inestable que una que tenga minerales más duros como el cuarzo, y presentará menores valores de fricción.

Con esta información, la división El Teniente podrá determinar según falla y mineralogía, zonas con mayor estabilidad y/o de menor riesgo, recurso que aporta a la planificación y operación minera.

# Capítulo 7

## Conclusiones

Se han realizando experimentos en roca pulverizada (gubia simulada) sistemáticamente de doble cizallamiento directo a una tensión normal que oscila entre 10 y 60 MPa y una velocidad de deslizamiento entre 1 y 300  $\mu\text{m/s}$ . Se han llevado a cabo pruebas de slide-hold-slide (1-1000 s) para analizar la capacidad de curación de la falla en la roca CMET, y los resultados señalan lo siguiente:

- Los valores de fricción en condición seca son cercanos a la tendencia del granito (20-60 % cuarzo) según los rangos definidos por Byerlee [1978].
- Los valores de fricción aumentan progresivamente durante todo el experimento, sin presentar un peak inicial mayor, es decir, alcanzan su máxima fricción en el estado estacionario.
- Hay un comportamiento de fortalecimiento de la velocidad en todos los esfuerzos normales, con el parámetro de tasa de fricción (a-b) que aumenta con estrés normal, es decir, a mayor esfuerzo normal el material sería más estable sísmicamente.
- Los valores de curación (healing) son casi nulos en diferentes períodos de espera y tensiones normales, siendo levemente mayores en condiciones secas y aumentando con el tiempo de espera.

Estos resultados sugieren que las muestras de gubia simulada de CMET son mecánicamente débiles y, debido a la baja curación por fricción, permanecen débiles a largo plazo. Además, los resultados señalan que las fallas dentro del complejo máfico pueden reactivarse fácilmente, predominantemente con comportamiento sísmico como se infiere por el comportamiento de fortalecimiento de la velocidad.

Luego, se realizan ensayos en muestras de falla en testigos, de cambios de esfuerzo normal (2-4-6 MPa) y de velocity step (3 a 300  $\mu\text{m/s}$ ), donde se obtiene:

- Los valores de fricción varían entre 0.4 y 0.7 principalmente (Tabla 7.1).

Tabla 7.1: Valores de fricción promedio por falla

Falla	Fricción $\mu$
NW	0.57
P	0.52
L	0.48
S	0.49
N1	0.55
N2	0.57
N3	0.70

- La mineralogía controla las condiciones de estabilidad de las fallas, tanto la diferencia de los parámetros a y b como el valor de la fricción, donde a mayor contenido de Molibdenita el valor de la fricción es menor y el deslizamiento es más inestable (velocity-weakening,  $a-b < 0$ ).
- Las fallas más inestables son las L (falla secundaria de <100 m) y P (falla principal de 700 m), que son las que poseen los mayores porcentajes de molibdenita.

Finalmente, al observar los resultados tanto en la gubia simulada como en las muestras de falla en los testigos, se puede concluir en cuanto a la fricción, que en el caso de las muestras de rocas de CMET pulverizadas, las fricciones se mantienen al rededor de 0.6 (en condición seca), que al comparar con las muestras de falla, son bastante similares a las fallas están en el promedio de estas, no siendo alterada por un incremento o disminución de la fricción producto de otras mineralogías presentes 7.1.

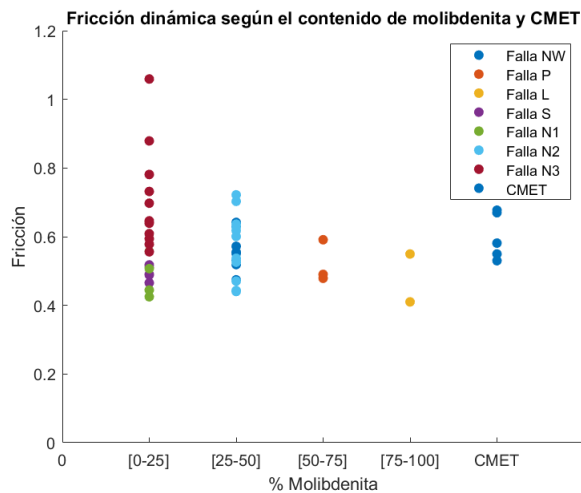


Figura 7.1: Gráfico con los valores de fricción dinámica con respecto al contenido de Molibdenita en cada muestra sumado al caso de las rocas pulverizadas de CMET.

Por otro lado, analizando el parámetro de estabilidad  $a-b$  se puede observar que en las muestras de gubia simulada de CMET los valores son positivos (condición de fortalecimiento)



y cercanos a cero, lo que al comparar con las muestras de falla evidencia que la mineralogía de relleno altera la estabilidad de la falla, por ejemplo, el contenido de molibdenita la hace menos estable.

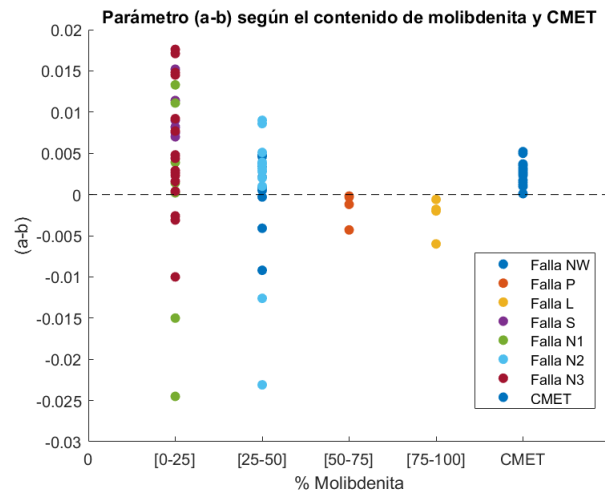


Figura 7.2: Gráfico con los valores de a-b con respecto al contenido de Molibdenita en cada muestra sumado al caso de las rocas pulverizadas de CMET.

# Bibliografía

- Aguirre, L. (1961). *Geología de los andes de Chile central: provincia de Aconcagua*. Editorial Universitaria, SA.
- Brace, W., y Byerlee, J. (1966). Stick-slip as a mechanism for earthquakes. *Science*, 153(3739), 990–992.
- Brzovic, A., Schachter, P., de los Santos, C., Vallejos, J., y Mas Ivars, D. (2015). Characterization and synthetic simulations to determine rock mass behaviour at the El Teniente mine, Chile. part i. , 8.
- Byerlee, J. (1967). Frictional characteristics of granite under high confining pressure. *Journal of Geophysical Research*, 72(14), 3639–3648.
- Byerlee, J. (1978). Friction of rocks. *Rock friction and earthquake prediction*, 615–626.
- Cárdenas, P. C. (1986). Geocronología K-Ar del yacimiento El Teniente y áreas adyacentes. *Revista geológica de Chile: An international journal on andean geology*(27), 3–26.
- Carpenter, B., Collettini, C., Viti, C., y Cavallo, A. (2016). The influence of normal stress and sliding velocity on the frictional behaviour of calcite at room temperature: Insights from laboratory experiments and microstructural observations. *Geophysical Journal International*, 205(1), 548–561.
- Charrier, R. (1981). Mesozoic and Cenozoic stratigraphy of the central Argentinian-Chilean Andes (32–35° S) and chronology of their tectonic evolution.
- Charrier, R., y Munizaga, F. E. (1979). Edades K-Ar de volcánicas cenozoicas del sector cordillerano del río Cachapoal, Chile (34° 15' de latitud sur). *Revista geológica de Chile: An international journal on andean geology*(7), 41–51.
- Charrier, R., Wyss, A., Flynn, J., Swisher III, C., Spichiger, S., y Zapatta, F. (1994). Nuevos antecedentes estratigráficos y estructurales para las formaciones Coya-Machalí y Abanico, entre 33° 50' y 35° S, cordillera principal chilena. En *Congreso geológico chileno* (Vol. 7, pp. 1316–1319).
- CODELCO. (2023). Estándares y metodologías de trabajo para geología de minas.

- Cuadra, P. (2010). Geocronología k-ar del yacimiento el teniente y áreas adyacentes. *Andean Geology*(27).
- Davidson, J., y Vicente, J. (1973). Características paleogeográficas y estructurales del área fronteriza de las nacientes del teno (chile) y santa elena (argentina)(cordillera principal, 35 a 35 15'latitud sur). En *Congreso geológico argentino* (pp. 11–55).
- Dieterich, J. H. (1979). Modeling of rock friction: 2. simulation of preseismic slip. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5), 2169–2175.
- Encinas, A., Sagripanti, L., Rodríguez, M. P., Orts, D., Anavalón, A., Giroux, P., . . . Valencia, V. (2021). Tectonosedimentary evolution of the coastal cordillera and central depression of south-central chile (36° 30'-42° s). *Earth-Science Reviews*, 213, 103465.
- Falcón, M., y Rivera, O. (1998). Estudio geológico distrital de la división el teniente de codelco-chile, escala 1: 25.000. *Informe inédito*.
- Faunes, A. (1981). Caracterización de la mineralogía metálica y de alteración en un sector del stock tonalítico del yacimiento el teniente. *Memoria de Título (Inédito)*. Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Fuenzalida, H. (1967). Corporación de fomento de la producción, geografía económica de chile. (99-151).
- Giehm, C. K. (1960). *Geología de la cordillera de los andes de chile central: provincias de santiago, o'higgins, colchagua y curicó*. Inst. de Investigaciones Geológicas.
- Giorgetti, C., Carpenter, B., y Collettini, C. (2015). Frictional behavior of talc-calcite mixtures. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(9), 6614–6633.
- Godoy, E., y Köeppen, R. (1993). Geología del área entre los ríos claro del maipo y cachapoal. *CODELCO Chile-SERNAGEOMIN*.
- Godoy, E., y Lara, L. (1994). Segmentación estructural andina a los 33-34: nuevos datos en la cordillera principal. En *Congreso geológico chileno* (pp. 1344–1348).
- González, A. (2008). Análisis estructural entre los valles del río tinguiririca y teno, cordillera principal de chile central: Microsismicidad y geología superficial. *Memoria de Título (Inédito)*, Universidad de Chile, 90.
- GRMD. (2014). Revisión de propiedades físico – mecánicas para la roca intacta y fallas de el teniente. *Informe Interno. Superintendencia Geología, División El Teniente, CODELCO – Chile, SGL-INF-081*.
- GRMD. (2018). Modelo geotécnico para el macizo rocoso y su aplicación en la minería de el teniente.

- Hoskins, E., Jaeger, J., y Rosengren, K. (1968). A medium-scale direct friction experiment. En *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* (Vol. 5, pp. 143–152).
- Jaeger, J. (1959). The frictional properties of joints in rock. *Geofisica pura e applicata*, 43, 148–158.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G., y Zimmerman, R. (2009). *Fundamentals of rock mechanics*. John Wiley & Sons.
- Kurtz, A. C., Kay, S. M., Charrier, R., y Farrar, E. (1997). Geochronology of miocene plutons and exhumation history of the el teniente region, central chile (34-35 8). *Andean Geology*, 24(1), 75–90.
- Lockner, D. A., y Beeler, N. M. (2002). Rock failure and earthquakes. *International Geophysics Series*, 81(A), 505–538.
- Maksaev, V., Munizaga, F., McWilliams, M., Fanning, M., Mathur, R., Ruiz, J., y Zentilli, M. (2005). New chronology for el teniente, chilean andes, from u-pb, 40ar/39ar, re-os, and fission-track dating: Implications for the evolution of a supergiant porphyry cu-mo deposit.
- Marone, C. (1998). Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26(1), 643–696.
- Munizaga, F., Maksaev, V., Mathur, R., Ruiz, J., McWilliams, M., y Thiele, K. (2002). Understanding molybdenite re-os ages from the el teniente porphyry copper deposit, chile. En *Gsa meeting abstr with progr* (Vol. 34, p. 336).
- Muralha, J., Grasselli, G., Tatone, B., Blümel, M., Chryssanthakis, P., y Yujing, J. (2014). Isrm suggested method for laboratory determination of the shear strength of rock joints: revised version. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, 291–302.
- Orellana, L., Scuderi, M., Collettini, C., y Violay, M. (2018). Frictional properties of opalinus clay: Implications for nuclear waste storage. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(1), 157–175.
- Ossandón, G. (1974). Petrología y alteración del pórfido dacítico, yacimiento el teniente. *Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago*. 116p.
- Paterson, M. S., y Wong, T.-f. (2005). *Experimental rock deformation: the brittle field* (Vol. 348). Springer.
- Piquer, J., Berry, R. F., Scott, R. J., y Cooke, D. R. (2016). Arc-oblique fault systems: their role in the cenozoic structural evolution and metallogensis of the andes of central chile. *Journal of Structural Geology*, 89, 101–117.

- Power, W., Tullis, T., Brown, S., Boitnott, G., y Scholz, C. (1987). Roughness of natural fault surfaces. *Geophysical Research Letters*, *14*(1), 29–32.
- Ramakrishnaiah, R., Mohammad, A., Divakar, D. D., Kotha, S. B., Celur, S. L., Hashem, M. I., ... others (2017). Preliminary fabrication and characterization of electron beam melted ti-6al-4v customized dental implant. *Saudi journal of biological sciences*, *24*(4), 787–796.
- Rivera, O., y Cembrano, J. (2000). Modelo de formación de cuencas volcano-tectónicas en zonas de transferencia oblicuas a la cadena andina: el caso de las cuencas oligo-miocénicas de chile central y su relación con estructuras nww-nw (33 00'-34 30's). En *Congreso geológico chileno* (pp. 631–636).
- Ruina, A. (1983). Slip instability and state variable friction laws. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *88*(B12), 10359–10370.
- Scholz, C. H. (2019). *The mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge university press.
- Seguel, J., Arriagada, C., Becerra, J., Martínez, F., Carrizo, D., y Floody, R. (2007). Estilos estructurales en el yacimiento el teniente. *Informe interno*.
- Shimamoto, T., y Logan, J. M. (1981). Effects of simulated clay gouges on the sliding behavior of tennessee sandston. *Tectonophysics*, *75*(3-4), 243–255.
- Sillitoe, R. H., y Perelló, J. (2005). Andean copper province: Tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery.
- Skewes, M. A., Arévalo, A., Floody, R., Zuñiga, P. H., y Stern, C. R. (2002). The giant el teniente breccia deposit: hypogene copper distribution and emplacement.
- Stewart, J., y Araya, R. (1972). Programa de exploración minera somex-iig en la alta cordillera de los andes entre los paralelos 34 10'y 35 10'latitud sur. *Instituto de Investigaciones Geológicas (Informe inédito)*.
- Thiele, R. (1980). *Hoja santiago, carta geológica de chile no. 39*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago.
- Turichshev, A., y Hadjigeorgiou, J. (2016). Triaxial compression experiments on intact veined andesite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*.
- Violay, M., Giorgetti, C., Cornelio, C., Aeschiman, F., Di Stefano, G., Gastaldo, L., y Wiemer, S. (2021). Highsteps: A high strain temperature pressure and speed apparatus to study earthquake mechanics. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *54*, 2039–2052.

# 0.1. Anexo A: Base de datos salbanda simulada

Tabla 0.1: Base de datos friccionales para gubia simulada en condición seca.

Muestra	Humedad	$\sigma_x$ [MPa]	$\mu_{peak}$	$\mu_{ss}$	Velocidad (mm/s)	$\mu_0$	Parámetro a	Parámetro b	(a-b)	Dc (mm)	Tiempo espera (s)	ps	ps	Healing ( $\Delta p$ )
h282	Dry	10	0.6336	0.6772	3	0.682	0.00686	0.00659	0.0027	7.068	1	0.701000	0.702100	0.001100
					10	0.684	0.00719	0.00700	0.0019	9.645	3	0.704700	0.706300	0.001600
					30	0.688	0.00805	0.00647	0.00158	7.788	10	0.703600	0.709650	0.006050
					100	0.696	0.00936	0.00730	0.00206	5.927	30	0.703600	0.713650	0.010050
					300	0.701	0.00143	0.00119	0.00024	3.369	100	0.707650	0.721350	0.013700
											300	0.708600	0.725350	0.016750
h284	Dry	15	0.544118	0.581286	3	0.582	0.00542	0.00452	0.0009	6.983	1	0.599654	0.600980	0.001326
					10	0.584	0.00584	0.00471	0.00113	8.942	3	0.600894	0.602855	0.001961
					30	0.590	0.00716	0.00457	0.00259	5.838	10	0.599827	0.603345	0.003518
					100	0.595	0.00761	0.00495	0.00266	6.821	30	0.599654	0.605594	0.005940
					300	0.599	0.00842	0.00599	0.00243	7.935	100	0.602999	0.612284	0.009285
											300	0.602970	0.614014	0.011044
h281	Dry	30	0.62895	0.6698	3	0.675	0.00477	0.00504	-0.00027	11.400	1	0.704267	0.705467	0.001200
					10	0.682	0.00621	0.00542	0.00079	10.587	3	0.707767	0.709550	0.001783
					30	0.690	0.00686	0.00488	0.00198	10.847	10	0.712050	0.715167	0.003117
					100	0.697	0.00815	0.00567	0.00248	10.701	30	0.716100	0.721900	0.005800
					300	0.706	0.00818	0.00440	0.00378	12.780	100	0.717917	0.727133	0.009216
											300	0.721000	0.732850	0.011850
h299	Dry	45	0.489091	0.530017	3	0.531	0.00471	0.00379	0.00092	20.207	1	0.592415	0.592447	0.000332
					10	0.538	0.00557	0.00340	0.00217	11.638	3	0.595373	0.596007	0.000634
					30	0.545	0.00629	0.00369	0.0026	11.621	10	0.598574	0.60121	0.001547
					100	0.551	0.00653	0.00369	0.00284	17.287	30	0.591217	0.594581	0.003364
					300	0.558	0.00721	0.00315	0.00406	16.092	100	0.593226	0.599031	0.005805
											300	0.595773	0.597222	0.007449
h283	Dry	60	0.508838	0.549712	3	0.555	0.00508	0.00335	0.00173	12.990	1	0.597777	0.597992	0.003215
					10	0.560	0.00556	0.00321	0.00235	12.656	3	0.599975	0.599538	0.000563
					30	0.565	0.00592	0.00326	0.00266	19.590	10	0.572102	0.573529	0.001427
					100	0.570	0.00702	0.00370	0.00332	17.845	30	0.575144	0.578302	0.003158
					300	0.575	0.00730	0.00391	0.00339	28.096	100	0.578849	0.584674	0.005825
											300	0.582050	0.589785	0.007735
										1000	0.582721	0.591227	0.008506	

Tabla 0.2: Base de datos friccionales para gubia simulada en condición húmeda.

Muestra	Humedad	$\sigma_n$ [MPa]	$\mu_{peak}$	$\mu_{ss}$	Velocidad (mm/s)	$\mu_0$	Parámetro a	Parámetro b	(a-b)	Dc (mm)	Tiempo espera (s)	$\mu_{ss}$	$\mu_s$	Healing ( $\Delta\mu$ )
h285	Wet	10	0.484126	0.488581	3	0.485	0.00693	0.00501	0.00192	19.585	1	0.474394	0.478503	0.004109
					10	0.484	0.00637	0.00648	-0.00011	25.284	3	0.475735	0.477638	0.001903
					30	0.482	0.00748	0.00671	0.00077	16.067	10	0.476817	0.479585	0.002768
					100	0.479	0.00786	0.00598	0.00188	16.275	30	0.478503	0.481964	0.003461
h287	Wet	30	0.449351	0.447333	300	0.477	0.00802	0.00539	0.00263	15.955	100	0.479152	0.487760	0.008608
					3	0.446	0.00567	0.00447	0.0012	25.799	300	0.483434	0.495156	0.011722
					10	0.447	0.00584	0.00437	0.00147	26.189	1000	0.448299	0.448803	0.000504
					30	0.445	0.00626	0.00546	0.0008	28.713	3	0.455089	0.456027	0.000938
h298	Wet	45	0.413447	0.421309	100	0.443	0.00647	0.00561	0.00086	28.896	10	0.459775	0.460928	0.001153
					300	0.443	0.00758	0.00594	0.00164	25.224	30	0.463899	0.466119	0.00222
					3	0.420	0.00553	0.00413	0.0014	34.366	100	0.469536	0.472708	0.003172
					10	0.418	0.00606	0.00402	0.00204	22.783	300	0.471915	0.475865	0.00395
h288	Wet	60	0.377148	0.39827	300	0.418	0.00712	0.00524	0.00188	26.948	100	0.433487	0.436726	0.003239
					3	0.402	0.00648	0.00381	0.00267	45.737	300	0.434689	0.439254	0.004565
					10	0.405	0.00654	0.00378	0.00276	39.711	1000	0.436448	0.441888	0.005440
					30	0.409	0.0067	0.00357	0.00313	35.397	1	0.422326	0.423738	0.001412
h288	Wet	60	0.377148	0.39827	100	0.414	0.00722	0.00488	0.00234	37.465	3	0.426312	0.427069	0.000757
					300	0.419	0.00765	0.00488	0.00277	33.140	10	0.428417	0.429145	0.000728
					3	0.409	0.0067	0.00357	0.00313	35.397	30	0.431185	0.432641	0.001456
					100	0.414	0.00722	0.00488	0.00234	37.465	100	0.434379	0.436967	0.002588
h288	Wet	60	0.377148	0.39827	300	0.419	0.00765	0.00488	0.00277	33.140	300	0.437550	0.441667	0.004117
					1000					1000	0.440239	0.446201	0.005962	

## 0.2. Anexo B: Base de datos muestras de falla

Tabla 0.3: Base de datos friccionales para muestras de fallas.

Falla	Muestra	$\sigma_n$ [MPa]	$\mu_{peak}$	$\mu_{ss}$	Velocidad [ $\mu\text{m/s}$ ]	$I_0$	Parámetro a	Parámetro b	(a-b)	Dc [mm]
Falla NW	Muestra 1	6	0.469870	0.464162	3 a 10	0.4503	0.0000	0.0003	-0.0003	3.000
					10 a 30	0.4326	0.0028	0.0020	0.0008	27.177
	Muestra 2	6	0.486881	0.489853	30 a 100	0.4313	0.0046	0.0138	-0.0092	195.140
					100 a 300	0.4497	0.0067	0.0108	-0.0041	70.777
Falla P	Muestra 3	6	0.488709	0.490340	3 a 10	0.5339	0.0068	0.0022	0.0046	4.156
					10 a 30	0.5819	0.0054	0.0020	0.0034	11.248
	Muestra 1	6	0.464356	0.492159	30 a 100	0.6168	0.0067	0.0038	0.0029	34.388
					100 a 300	0.6235	0.0094	0.0056	0.0038	14.297
Falla L	Muestra 1	4	0.417430	0.312804	3 a 10	0.4801	0.0027	-0.0021	0.0048	47.873
					10 a 30	0.4811	0.0046	0.0041	0.0005	90.875
	Muestra 2	6	0.413090	0.442474	30 a 100	0.4731	0.0073	0.0052	0.0021	78.165
					100 a 300	0.5142	0.0122	-23.9450	23.9572	365400.000
Falla S	Muestra 1	4	0.461639	0.477862	3 a 10	0.5080	0.0019	0.0031	-0.0012	4.325
					10 a 30	0.5218	0.0020	0.0023	-0.0003	8.991
	Muestra 2	4	0.413090	0.442474	30 a 100	0.5085	0.0033	0.0035	-0.0002	17.034
					100 a 300	0.3818	0.0028	0.0071	-0.0043	81.835
Falla N1	Muestra 1	6	0.416544	0.345179	3 a 10	0.3226	0.0017	0.0023	-0.0006	22.799
					10 a 30	0.3148	0.0025	0.0043	-0.0018	45.924
	Muestra 2	6	0.413090	0.442474	30 a 100	0.3147	0.0030	0.0050	-0.0020	75.004
					100 a 300	0.2969	0.0018	0.0078	-0.0060	110.000
Falla N2	Muestra 1	4	0.461639	0.477862	3 a 10	0.5059	0.0042	-0.0033	0.0075	9.989
					10 a 30	0.5028	0.0053	-3.0937	3.099	302290.000
	Muestra 2	4	0.413090	0.442474	30 a 100	0.5052	0.0051	-0.0039	0.0090	10.000
					100 a 300	0.5143	0.0058	1.2826	-1.2768	317180.000
Falla N3	Muestra 1	6	0.416544	0.345179	3 a 10	0.4523	0.0042	-0.0028	0.0070	9.999
					10 a 30	0.4750	0.0048	-0.0034	0.0082	10.000
	Muestra 2	6	0.413090	0.442474	30 a 100	0.4904	0.0059	-0.0055	0.0114	10.000
					100 a 300	0.5153	0.0077	-0.0075	0.0152	10.000
Falla N4	Muestra 1	6	0.416544	0.345179	3 a 10	0.3389	0.0043	0.0288	-0.0245	200.288
					10 a 30	0.3518	0.0035	0.0185	-0.0150	120.000
	Muestra 2	6	0.413090	0.442474	30 a 100	0.4157	0.0101	-0.0010	0.0111	120.000
					100 a 300	0.4027	0.0128	0.0089	0.0039	44.001
Falla N5	Muestra 1	6	0.416544	0.345179	3 a 10	0.4226	0.0015	0.0013	0.0002	20.000
					10 a 30	0.4051	0.0075	-0.0058	0.0133	100.000
	Muestra 2	6	0.413090	0.442474	30 a 100	0.4049	0.0029	0.0015	0.0014	30.000
					100 a 300	0.3977	0.0038	-0.0001	0.0039	20.002



Tabla 0.4: Base de datos friccionales para muestras de fallas (continuación).

Falla	Muestra	$\sigma_n$ [MPa]	$\mu_{peak}$	$\mu_{ss}$	Velocidad [ $\mu\text{m/s}$ ]	$\mu_0$	Parámetro a	Parámetro b	(a-b)	Dc [mm]
Falla N2	Muestra 1	4	0.595633	0.610267	3 a 10	0.6076	0.0058	0.0038	0.0020	11.749
					10 a 30	0.5623	0.0059	15.4633	-15.4574	498430.000
					30 a 100	0.4796	0.0067	0.0298	-0.0231	829.160
					100 a 300	0.4937	0.0069	0.0041	0.0028	30.002
	Muestra 2	6	0.513671	0.523831	3 a 10	0.5315	0.0040	0.0166	-0.0126	130.000
					10 a 30	0.4169	0.0094	0.0043	0.0051	50.272
					30 a 100	0.4523	0.0013	-0.0016	0.0029	100.000
					100 a 300	0.4597	0.0091	0.0005	0.0086	99.996
	Muestra 3	4	0.440653	0.465851	3 a 10	0.4578	0.0034	-0.6356	0.6390	59610.000
					10 a 30	0.4590	0.0024	-0.0013	0.0037	9.999
					30 a 100	0.4741	0.0057	0.0021	0.0036	4.683
					100 a 300	0.4923	0.0052	-0.0038	0.0090	9.996
Muestra 4	4	0.476743	0.410302	3 a 10	0.4126	0.0077	0.0046	0.0031	16.062	
				10 a 30	0.4105	0.0070	0.0031	0.0039	24.531	
				30 a 100	0.4112	0.0073	0.0063	0.0010	103.455	
				100 a 300	0.4165	0.0087	0.0051	0.0036	45.810	
Falla N3	Muestra 1	4	0.532203	0.538164	3 a 10	0.5414	0.0020	0.0016	0.0004	15.305
					10 a 30	0.5561	0.0066	0.0043	0.0023	1.631
					30 a 100	0.5542	0.0046	0.0017	0.0029	19.412
					100 a 300	0.5541	0.0064	0.0016	0.0048	14.440
	Muestra 2	4	0.670119	0.663393	3 a 10	0.6783	0.0024	0.0050	-0.0026	47.067
					10 a 30	0.6487	0.0003	0.0103	-0.0100	120.000
					30 a 100	0.6299	0.0033	0.0017	0.0016	100.000
					100 a 300	0.5890	0.0049	0.0080	-0.0031	65.746
	Muestra 3	4	0.531662	0.568431	3 a 10	0.5890	0.0040	-0.0108	0.0148	197.724
					10 a 30	0.6041	0.0067	-0.0104	0.0171	170.000
					30 a 100	0.6251	0.0058	-0.0087	0.0145	170.000
					100 a 300	0.6560	0.0073	-0.0103	0.0176	180.000
Muestra 4	6	0.511943	0.564736	3 a 10	0.5436	0.0021	-0.0023	0.0044	9.962	
				10 a 30	0.5673	0.0027	0.0001	0.0026	9.996	
				30 a 100	0.5511	0.0043	-0.0049	0.0092	9.985	
				100 a 300	0.5728	0.0042	-0.0035	0.0077	9.998	